

带有指令滤波的电力弹簧系统反步控制

杨成顺¹, 韩通润¹, 许德智², 戴宇辰³, 黄宵宁¹

(1. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167; 2. 江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122; 3. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:针对新能源发电系统因间接性和不确定性导致的电压波动问题,文中首次将反步控制策略应用于电力弹簧(electric spring, ES)系统,并提出一种带有指令滤波的ES反步控制策略。根据ES的数学模型利用反步法设计控制器,并加入指令滤波器,以解决ES反步控制中的计算膨胀问题,同时设计误差补偿信号,并利用Lyapunov稳定性理论验证系统稳定性。通过仿真模拟新能源发电系统网侧电压波动时,ES对关键负载(critical load, CL)电压稳定的效果,以及不同系统参数对文中控制策略的敏感性分析。与传统的比例积分(proportional-integral, PI)控制对比,CL电压动态响应速度提高0.07 s, CL电压畸变率降低31%,参数敏感性分析中CL电压最大偏差率为0.318%,能承受的最大电压幅值波动范围提高52.9 V。仿真结果验证了文中所提出的控制策略具有响应速度快、谐波含量低、抗干扰能力强的优势。

关键词:新能源发电系统;电力弹簧(ES);指令滤波;反步控制;关键负载(CL);电压波动;敏感性分析

中图分类号: TM761; TP273

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)02-0105-09

0 引言

在“碳达峰、碳中和”以及构建新型电力系统的目标下,新能源发电比例快速增长。由于其间接性和不确定性导致发电量难以预测,易造成电压波动问题^[1-2],电压波动在严重的情况下极易对用电设备造成破坏。为此,控制电压波动已成为新能源发电中亟待解决的问题之一。电力弹簧^[3](electric spring, ES)的提出为稳定新能源发电系统的电压波动提供新思路,其控制目标之一是将关键负载(critical load, CL)上的电压波动控制在一定的范围内,从而使CL达到稳定的参考电压;其次ES与其串联的非关键负载(non-critical load, NCL)构成智能负载(smart load, SL),可以承担不稳定的交流电源产生的电压波动,其特点为快速实现电力供应和需求的平衡。

基于在新能源发电方面的应用优势和潜力,ES近年来引起学者的广泛关注^[4-16]。在ES拓扑研究方面,文献[4-7]研究了ES的3种拓扑。文献[8-9]对ES的原理、拓扑和应用进行分析,并且对ES的控制方法进行综述。在ES控制研究方面,目前对ES的控制方法仍以比例积分(proportional-integral, PI)控制为主,文献[10]提出ES在传统PI控制上改进的最优PI算法,提高系统的适应性与鲁

棒性,但仍然无法很好地克服参数的不确定性所带来的影响。文献[11]提出直、交流电压双环控制,实现ES可以向电网提供电压支持以响应电网的动态需求,但是该控制策略输出的电压谐波含量较高。文献[12]通过无源控制理论实现ES对功率的跟踪和CL电压的稳定,但是当电网电压变化的瞬间,CL电压波动较为明显。文献[13]提出相位控制法,实现ES有功无功混合补偿,但是该控制方法需要采集的系统参数信息较多,并且对参数敏感。文献[14]提出一种径向弦向分解(radial-chordal decomposition, RCD)方法,RCD法可以保证CL电压稳定的同时,实现SL功率幅值以及相角的独立控制,对线路参数的依赖较小。文献[15]采用指令滤波器逼近非线性函数,解决永磁同步电机反步控制策略中的计算膨胀问题。

ES属于典型的多变量、强非线性系统,传统的PI控制方法存在控制精度差、鲁棒性弱等问题,特别是电压发生大幅度波动时,很难达到ES理想的控制效果。为此,文中将反步控制策略首次应用于ES系统中。反步控制^[16-18]在设计非线性系统的鲁棒或自适应控制器方面具有明显的优越性,在控制无人机^[19]、机器人^[20]等领域得到广泛的应用。文中设计一种适用于非线性系统的ES反步控制策略来实现对CL电压的稳定。根据ES的数学模型,构造Lyapunov函数并利用反步法设计虚拟控制器,同时引入指令滤波器^[21]来解决此过程中的计算膨胀问题,利用Lyapunov函数稳定性验证系统的全局稳

收稿日期:2023-09-28;修回日期:2023-12-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62222307);国家自然科学基金委资助项目(202106950045)

定。最后通过仿真将 ES 的 PI 控制与文中控制策略作比较,进行验证分析。

1 ES 的工作原理

第 2 代电力弹簧 ES-2 的拓扑^[5-6,22]如图 1 所示,由 1 个直流电压源、4 个晶闸管 (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) S_1 — S_4 组成的单相电压源逆变器和 1 个 LC 低通滤波器构成,其中, U_{nc} 为 NCL 上的电压; U_{dc} 为逆变器直流侧电压。ES-2 与非关键负载 R_3 串联组成 SL, SL 与关键负载 R_2 并联。当电网侧电压和能量发生波动时, ES 将电网侧的波动转移到 NCL 上,通过改变 NCL 的电压来实现 CL 电压实时自主跟踪电压参考值。文献[22]对典型的 ES-2 的拓扑和状态方程进行详细的描述与推导,此处不再赘述。

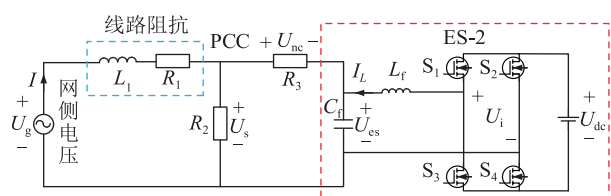


图 1 ES-2 应用系统拓扑

Fig.1 Topology of ES-2 application system

ES-2 的状态方程为:

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{U_{es}}{L_f} + \frac{U_i}{L_f} \quad (1)$$

$$\frac{dU_{es}}{dt} = \frac{I_L}{C_f} + \frac{U_{es}}{C_f(R_2 + R_3)} + \frac{R_2 I}{C_f(R_2 + R_3)} \quad (2)$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{R_2 U_{es}}{L_1(R_2 + R_3)} - \frac{(R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3) I}{L_1(R_2 + R_3)} + \frac{U_g}{L_1} \quad (3)$$

$$U_s = \frac{R_2}{R_2 + R_3} U_{es} + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} I \quad (4)$$

式中: U_g 为网侧电压; R_1 、 L_1 分别为线路电阻、电感; R_2 、 R_3 分别为 CL 和 NCL 电阻; I 为电网注入公共节点 (point of common coupling, PCC) 的电流; L_f 为滤波电感; C_f 为滤波电容; I_L 为滤波电感电流; U_s 为 CL 的电压; U_i 为单相电压源逆变器输出电压; U_{es} 为滤波电容 C_f 输出的电压即 ES-2 输出的电压。

2 控制器设计

文中主要利用反步控制法,针对上述 ES 数学模型设计虚拟控制器,并将指令滤波加入到虚拟控制器中,避开对虚拟控制器的反复求导,使得 CL 电压能够良好地跟踪参考电压有效值 U_{sref} 。

2.1 虚拟控制器设计

由逆变电路的原理可知,单相电压源逆变器的输出电压 U_i 与脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 信号 m 的关系为 $U_i = U_{dc} m$, 因此式(1)可改写为:

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{U_{es}}{L_f} + \frac{U_{dc} m}{L_f} \quad (5)$$

定义 CL 的电压与参考电压的误差量:

$$e_1 = U_s - U_{sref} \quad (6)$$

对式(6)求导可得:

$$\frac{de_1}{dt} = \frac{dU_s}{dt} - \frac{dU_{sref}}{dt} \quad (7)$$

定义 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (8)$$

定义虚拟控制器参数为 k_1 , 对式(8)进行求导并将式(7)代入可得:

$$\begin{aligned} \frac{dV_1}{dt} &= e_1 \frac{de_1}{dt} = e_1 \left(\frac{dU_s}{dt} - \frac{dU_{sref}}{dt} \right) = \\ &-k_1 e_1^2 + e_1 \left(k_1 e_1 + \frac{dU_s}{dt} - \frac{dU_{sref}}{dt} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

对式(4)进行求导:

$$\frac{dU_s}{dt} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} \times \frac{dU_{es}}{dt} + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \times \frac{dI}{dt} \quad (10)$$

根据 Lyapunov 稳定性定理,若使系统保持稳定,则必须满足 $\frac{dV_1}{dt} \leq 0$, 所以令 $k_1 e_1 + \frac{dU_s}{dt} - \frac{dU_{sref}}{dt} = 0$ 即可满足。将式(2)、式(3)、式(10)代入 $k_1 e_1 + \frac{dU_s}{dt} - \frac{dU_{sref}}{dt} = 0$, 得到逆变器的虚拟控制器输出电流 I_L^d 为:

$$\begin{aligned} I_L^d &= -\frac{(R_2 + R_3) C_f}{R_2} \left(k_1 e_1 - \frac{dU_{sref}}{dt} \right) - \frac{R_3 C_f}{L_1} U_g + \\ &\left[\frac{1}{R_2 + R_3} + \frac{R_2 R_3 C_f}{L_1 (R_2 + R_3)} \right] U_{es} + \\ &\left[\frac{(R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3) R_3 C_f}{L_1 (R_2 + R_3)} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right] I \end{aligned} \quad (11)$$

2.2 指令滤波器

高阶的非线性系统中,在设计反步控制器时,会对虚拟控制器进行反复求导,易造成计算出现“微分膨胀问题”,从而会影响虚拟控制器对系统的控制效果^[23]。为解决此问题,文中在虚拟控制器中引入指令滤波器,即将文中设计的虚拟控制器电流 I_L^d 通过指令滤波器得到输出电流 I_L^c 和输出电流微分

dI_L^c/dt 。指令滤波器结构如图 2 所示, x^d 为指令滤波器的输入信号; x^c 、 dx^c/dt 分别为指令滤波器的输出信号和输出信号微分; ω_{ni} 、 ξ_i 分别为指令滤波器的带宽和阻尼。

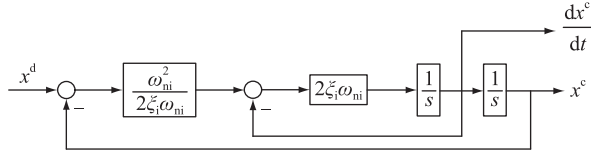


图 2 指令滤波器结构

Fig.2 Command filtering structure

指令滤波器的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \frac{dy_1}{dt} \\ \frac{dy_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{ni}^2 & -\xi_i \omega_{ni} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{ni}^2 \end{bmatrix} x^d \quad (12)$$

式中: y_1 、 y_2 分别为指令滤波器的输出信号 x^c 和输出信号微分 dx^c/dt 。为实现控制目标, 指令滤波器需要将输入的信号 x^d 和输出的信号 x^c 的误差尽可能减少, 此时只要将指令滤波器内部的带宽 ω_{ni} 尽可能地取大, 则可以使 x^d 和 x^c 的误差接近于 0。

2.3 指令滤波反步控制器设计

带有指令滤波的 ES 反步控制流程见图 3。

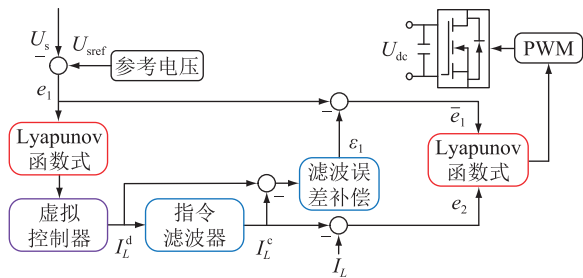


图 3 带有指令滤波的 ES 反步控制流程

Fig.3 ES backstepping control flow with command filtering

为补偿指令滤波器的滤波误差, 重新定义误差量为:

$$\bar{e}_1 = e_1 - \varepsilon_1 \quad (13)$$

式中: ε_1 为指令滤波器的误差补偿信号, 并将其导数设计为式(14)所示。

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = -k_1 \varepsilon_1 + \frac{R_2}{(R_2 + R_3)C_f} (I_L^c - I_L^d) \quad (14)$$

定义输出逆变器电流误差量为:

$$e_2 = I_L - I_L^c \quad (15)$$

对式(15)求导可得:

$$\frac{de_2}{dt} = \frac{dI_L}{dt} - \frac{dI_L^c}{dt} \quad (16)$$

为稳定整个系统, 再次定义 Lyapunov 函数为:

$$V_2 = \frac{1}{2} \bar{e}_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (17)$$

对式(16)进行求导可得:

$$\frac{dV_2}{dt} = \bar{e}_1 \frac{d\bar{e}_1}{dt} + e_2 \frac{de_2}{dt} \quad (18)$$

为求得 $\frac{d\bar{e}_1}{dt}$, 对式(13)求导并将式(7)、式

(11)、式(14)代入得:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{e}_1}{dt} &= \frac{de_1}{dt} - \frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{dU_s}{dt} - \frac{dU_{sref}}{dt} + k_1 \varepsilon_1 - \\ &\frac{R_2}{(R_2 + R_3)C_f} (I_L^c - I_L^d) = -k_2 \bar{e}_1 + \frac{R_2}{(R_2 + R_3)C_f} e_2 \end{aligned} \quad (19)$$

定义指令滤波反步控制器参数为 k_2 , 将式(19)

代入(18)可得:

$$\begin{aligned} \frac{dV_2}{dt} &= \bar{e}_1 \frac{d\bar{e}_1}{dt} + e_2 \frac{de_2}{dt} = -k_1 \bar{e}_1^2 - k_2 e_2^2 + \\ &e_2 \left[\frac{R_2}{(R_2 + R_3)C_f} \bar{e}_1 + \frac{de_2}{dt} + k_2 e_2 \right] \end{aligned} \quad (20)$$

为满足 Lyapunov 稳定性使系统稳定, 必须满足

$\frac{dV_2}{dt} \leq 0$, 则 $\frac{R_2}{(R_2 + R_3)C_f} \bar{e}_1 + \frac{de_2}{dt} + k_2 e_2 = 0$ 即可满足稳定性要求, 将式(5)代入式(20)得到 PWM 信号的控制率 m^d 为:

$$m^d = \frac{L_f}{U_{dc}} \left[-k_2 e_2 - \frac{R_2}{(R_2 + R_3)C_f} \bar{e}_1 + \frac{1}{L_f} U_{es} + \frac{dI_L^c}{dt} \right] \quad (21)$$

系统控制策略结构如图 4 所示。

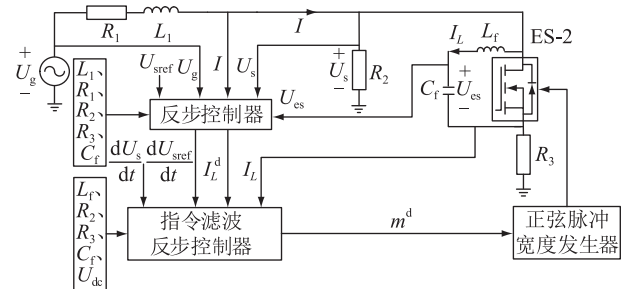


图 4 ES 控制策略结构

Fig.4 ES control strategy structure

2.4 稳定性分析

在设计虚拟控制器电流和控制率过程中, 使用 Lyapunov 函数来保持系统的稳定性, 系数 k_1 、 k_2 均为大于 0 的常数, 由式(8)、式(17)可知, 所构造的 2 个 Lyapunov 函数式均为正定函数。

对上述 2 个 Lyapunov 函数式进行求导, 并将设

计的虚拟控制器和控制律的式(11)、式(21)分别代入式(9)、式(20)中可得:

$$\frac{dV_1}{dt} = e_1 \frac{de_1}{dt} = -k_1 e_1^2 \leq 0 \quad (22)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = e_1 \frac{d\bar{e}_1}{dt} + e_2 \frac{de_2}{dt} = -k_1 \bar{e}_1^2 - k_2 e_2^2 \leq 0 \quad (23)$$

根据 Lyapunov 稳定性理论可知,所设计的虚拟控制器电流 I_l^d 和控制率 m^d 在原点处渐进稳定,从而确保整个系统的稳定性。

2.5 ES 稳态运行界限分析

为确保 ES 能在允许的运行范围内达到理想的控制效果,须对其稳态运行界限进行分析。根据图 1 所示经典 ES-2 拓扑,利用基尔霍夫定理可得:

$$U_g = I(R_1 + L_1) + U_s \quad (24)$$

$$U_s = U_{es} + U_{nc} \quad (25)$$

$$I = I_{nc} + I_c = \frac{U_s}{R_2} + \frac{U_{nc}}{R_3} \quad (26)$$

式中: I_{nc} 为 NCL 上的电流; I_c 为流过 CL 的电流。

联立式(24)一式(26)可得:

$$U_{es} = U_s \left(1 + \frac{R_3}{R_1 + L_1} + \frac{R_3}{R_2} \right) - \frac{R_3}{R_1 + L_1} U_g \quad (27)$$

根据式(27)分析可知,ES 输出电压 U_{es} 与线路电阻 R_1 和电感 L_1 、CL 电阻 R_2 、NCL 电阻 R_3 、CL 电压 U_s 和电网电压 U_g 有关。则 ES 输出电压 U_{es} 须满足的运行约束界限为:

$$\begin{cases} U_{es, \min, \text{rated}} \leq U_{es} \leq U_{es, \max, \text{rated}} \\ U_{sref} - U_{nc, \max, \text{rated}} \leq U_{es} \leq U_{sref} - U_{nc, \min, \text{rated}} \\ U_{sref} - R_3 I_{nc, \max, \text{rated}} \leq U_{es} \leq U_{sref} - R_3 I_{nc, \min, \text{rated}} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $U_{es, \min, \text{rated}}$ 、 $U_{es, \max, \text{rated}}$ 分别为 ES 输出电压额定值下、上边界; $U_{nc, \min, \text{rated}}$ 、 $U_{nc, \max, \text{rated}}$ 分别为 NCL 上的输出电压额定值下、上边界; $I_{nc, \min, \text{rated}}$ 、 $I_{nc, \max, \text{rated}}$ 分别为流过 SL 上的电流额定值下、上边界。

根据式(27)、式(28)可得,ES 在其稳态运行边界内输出的电压 U_{es} 为:

$$U_{es} = \begin{cases} U_{es, \max} & U_g < U_{g, \min} \\ U_s \left[\frac{R_2 R_3 + R_3 (R_1 + L_1)}{(R_1 + L_1) R_2} - \frac{R_3}{R_1 + L_1} U_g \right] & U_{g, \min} \leq U_g \leq U_{g, \max} \\ U_{es, \min} & U_g > U_{g, \max} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $U_{es, \max}$ 、 $U_{es, \min}$ 分别为 ES 输出电压的最大值和最小值; $U_{g, \max}$ 、 $U_{g, \min}$ 分别为网侧电源电压的最大值和最小值。

通过式(5)可知逆变器的输出方程:

$$U_{dc} m = U_{es} + L_f \frac{dI_L}{dt} \quad (30)$$

结合式(29)、式(30),可得 ES 直流侧电压 U_{dc} 稳态运行边界为:

$$U_{dc} = \begin{cases} U_{dc, \max} & U_g < U_{g, \min} \\ U_s \left[1 + \frac{R_2 R_3 + R_3 (R_1 + L_1)}{(R_1 + L_1) R_2} \right] - \frac{R_3}{R_1 + L_1} U_g + L_f \frac{dI_L}{dt} & U_{g, \min} \leq U_g \leq U_{g, \max} \\ U_{dc, \min} & U_g > U_{g, \max} \end{cases} \quad (31)$$

式中: $U_{dc, \min}$ 、 $U_{dc, \max}$ 分别为 ES 直流侧电压的最小值和最大值。

分析式(31)可知,ES 的输出电压运行界限与线路阻抗、CL 阻值、NCL 阻值以及直流侧电压的大小相关。若电网网侧电压发生超过稳态运行范围的波动,使 ES 失去稳态运行的能力,可调节上述电阻值以及增大直流侧电压,来扩大 ES 输出电压稳态运行界限范围。

3 仿真及结果分析

为验证文中提出的带有指令滤波的反步控制策略的可行性和优越性,在 MATLAB/Simulink 对其进行仿真实验,并将带有指令滤波的反步控制策略和 PI 控制^[24-25]策略进行对比分析。ES 仿真模型中的各元件的参数如表 1 所示。

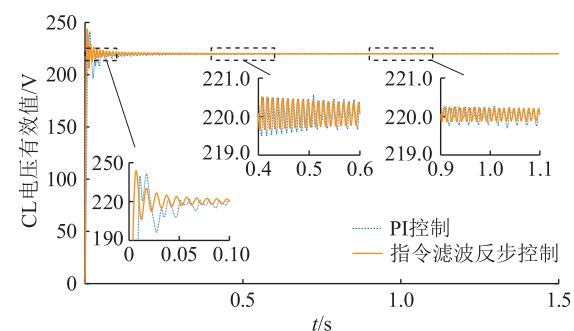
表 1 系统模型参数

参数	数值
电网频率 f/Hz	50
电网参考电压有效值 U_{sref}/V	220
直流侧电压 U_{dc}/V	600
线路阻值 $R_1 + j\omega L_1/\Omega$	0.2+j0.02
CL 阻值 R_2/Ω	100
NCL 阻值 R_3/Ω	50
滤波电感 L_f/mH	5.6
滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	60
k_1	50 000
k_2	300

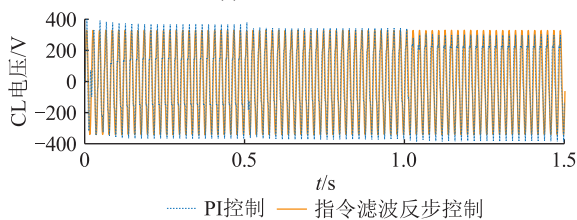
3.1 网侧电压波动对 CL 电压的稳定效果

为验证新能源发电系统网侧电压瞬间突变时 ES 的控制效果,整个仿真过程时长设计为 1.5 s,在 0.5 s 时网侧输出电压幅值从 320 V 下降至 300 V;

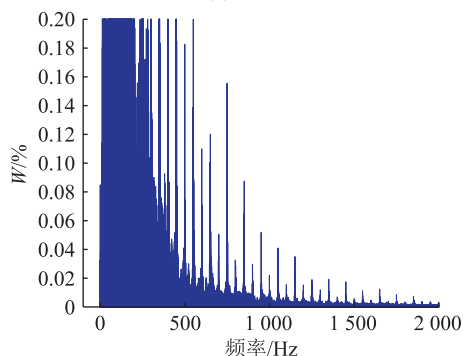
在 1 s 时,从 300 V 下降至 280 V。仿真结果如图 5 所示,其中图 5(a) 为 CL 电压的有效值波形;图 5(b) 为 CL 电压波形。从图 5(a) 中可以看出,文中所提控制策略的 CL 电压在 0.03 s 附近达到相对稳定,PI 控制策略的 CL 电压在 0.1 s 附近达到相对稳定,文中控制策略比 PI 控制电压达到稳定快 0.07 s。在 0.5 s 和 1.0 s 网侧电压瞬变时刻,PI 控制下,CL 电压出现明显的波动和抖振,并且不能良好地跟踪参考电压,文中所提出的控制策略未出现明显的电压波动,同时也能将 CL 的电压牢牢地锁定在 220 V 附近。图 5(c)、(d) 分别为 2 种控制方式下快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT) 波形,其中, W 为关键负载电压失真波形幅值的最大值减最小值与标准基波最大值减最小值的比值,整个仿真过程中可以看出 PI 控制策略下,CL 电压波形总谐波失真度(total harmonic distortion, THD) 为 31.57%,幅值为 296.7 V;文中提出的控制策略 CL 电压波形 THD 为 0.57%,幅值为 310.9 V,波形畸变率降低 31%。相比于 PI 控制,文中提出的控制策略使 CL 的电压波形谐波含量大大减少、波形畸变率更低、CL 电压更加稳定。



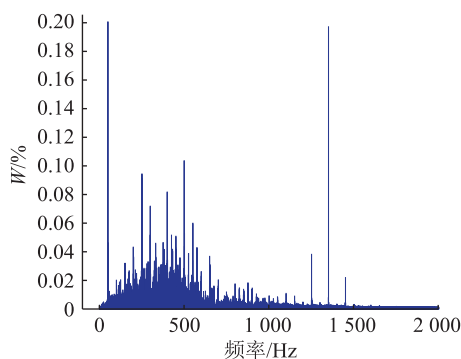
(a) CL电压有效值波形



(b) CL电压波形



(c) PI控制策略FFT波形



(d) 文中控制策略FFT波形

图5 电网侧电压变化时 CL 电压

Fig.5 CL voltage when grid-side voltage changes

图 6 为文中控制策略下的 NCL 电压波形,当网侧电压高于参考电压时,ES 处于降压运行模式,NCL 电压升高;当网侧电压低于参考电压时,ES 处于升压运行模式,NCL 电压降低,同时系统的电压波动转移给 NCL。

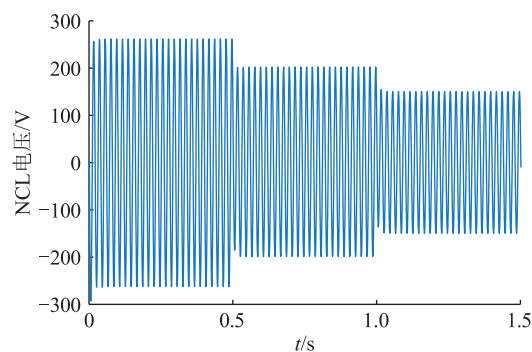


图6 电网侧电压变化时 NCL 电压

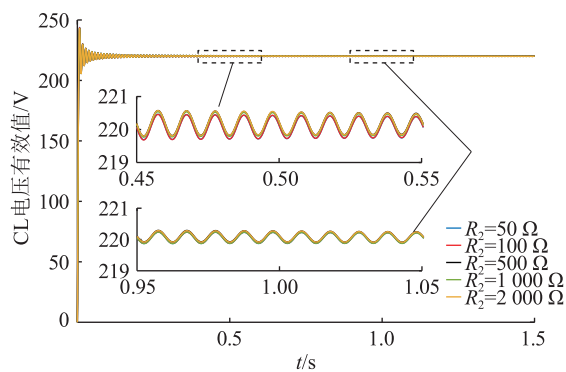
Fig.6 NCL voltage when the grid-side voltage changes

3.2 系统参数敏感性分析

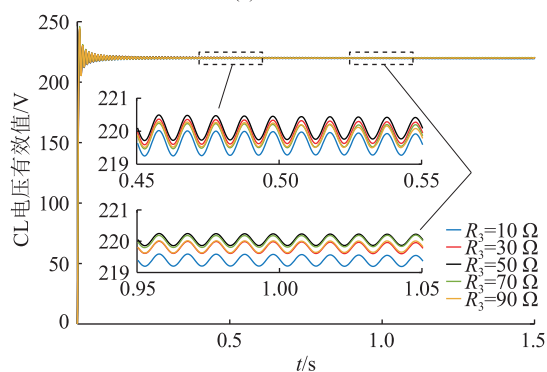
为验证系统参数对文中控制策略的影响程度,进行系统参数敏感性分析。保留 3.1 节中实验的电压突变情况和表 1 的系统参数,仅改变研究对象参数的值。图 7(a) — (d) 分别为 CL 阻值、NCL 阻值、线路电感值和电阻值对 CL 电压有效值影响的分析,在系统参数改变时研究文中控制策略对 CL 电压的控制效果。结果显示当系统参数发生变化时,CL 电压的有效值都能稳定趋于 220 V,图 7(b) 中,NCL 阻值的变化对控制效果影响最大,但是最大电压偏差也能控制在 0.7 V 左右,偏差率约为 0.318%,说明文中的控制策略对系统参数的敏感性较低。

3.3 ES 所能承受的电压波动范围

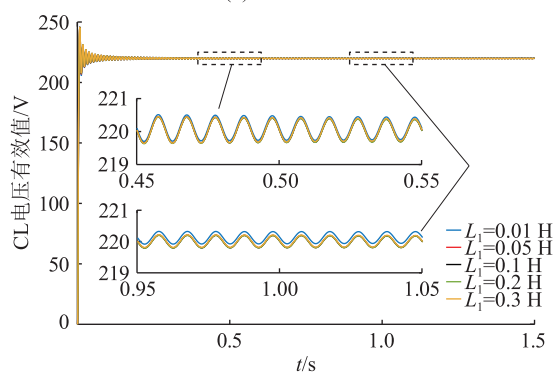
为比较 2 种控制方式下 ES 所能承受尽可能大的网侧电压波动范围,文中通过改变网侧电压的幅值不断逼近 ES 所能承受电压波动范围的临界值。仿真结果如图 8 所示,其中图 8(a)、(b) 分别为网侧



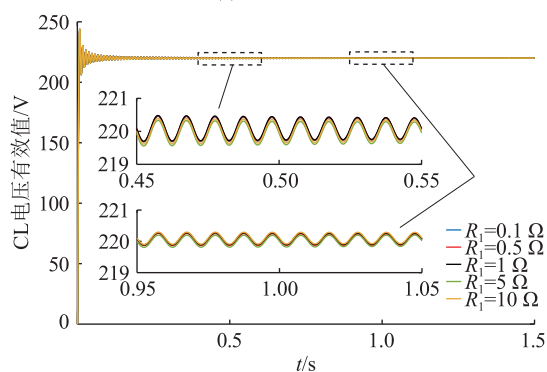
(a) CL阻值影响



(b) NCL阻值影响



(c) 线路电感值影响

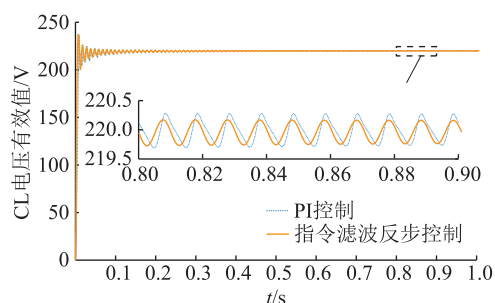


(d) 线路电阻值影响

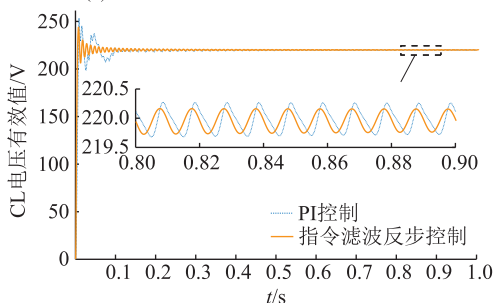
图7 系统参数敏感性分析结果

Fig.7 Analysis results of system parameter sensitivity
电压幅值为 272.4 V 和 320.7 V 时,即传统 PI 控制策略下 ES 在极限运行电压时,2 种控制策略下 CL 电压有效值波形。

图 9(a)、(b) 分别为网侧电压幅值为 268.5 V 和 369.5 V 时,即文中控制策略下,ES 在极限运行



(a) 电网侧电压为 272.4 V 时 CL 电压有效值

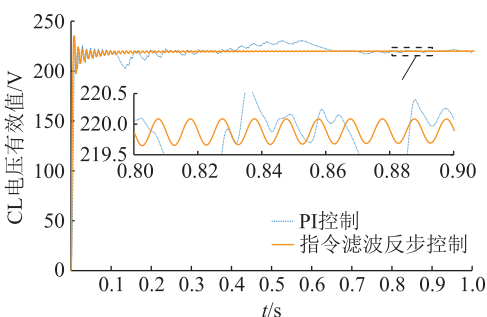


(b) 电网侧电压为 320.7 V 时 CL 电压有效值

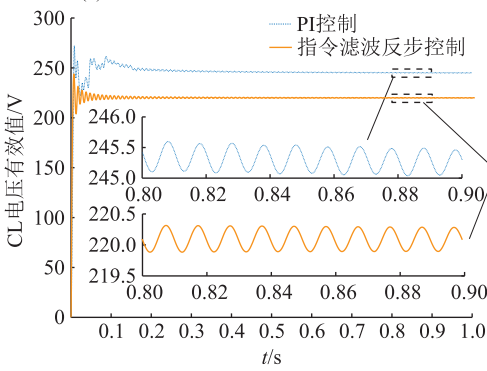
图 8 电网侧电压为 272.4 V 和 320.7 V 时 CL 电压有效值

Fig.8 The CL effective voltage values when the grid-side voltage is 272.4 V and 320.7 V

电压时,2 种控制策略下 CL 电压有效值波形。



(a) 电网侧电压为 268.5 V 时 CL 电压有效值



(b) 电网侧电压为 369.5 V 时 CL 电压有效值

图 9 电网侧电压为 268.5 V 和 369.5 V 时 CL 电压有效值

Fig.9 The CL effective voltage values when the grid-side voltage is 268.5 V and 369.5 V

经分析可知 PI 控制策略下,实现 ES 对 CL 电压稳定的控制目标,能够承受系统网侧的电压波动范围为 272.4 ~ 320.7 V (有效值为 192.62 ~ 226.77 V);带指令滤波反步控制策略下,实现 CL 电压稳定

的控制目标,能够承受的网侧电压波动范围为 268.5~369.7 V(有效值为 189.85~261.27 V)。验证了文中所提出的策略能够使 ES 具有更大承受电压波动范围的能力,抗干扰能力强。

4 结论

文中提出一种带有指令滤波的反步控制策略,应用于 ES 系统中,并且结合新能源发电系统模拟分布式电源发电过程中出现的间接性和不确定性所带来的电压波动问题。通过理论分析和推导以及仿真实验证明带有指令滤波的反步控制策略的优越性,同时得出下列结论:

(1) 在新能源发电系统网侧电压发生波动时,文中提出的控制策略相比 PI 控制达到稳定速度快 0.07 s,动态响应速度快;波形畸变率降低 31%,且基波幅值(310.9 V)能良好地跟踪参考电压幅值(311 V),相比 PI 控制电压波形谐波含量减少、畸变率降低,且对 CL 电压稳定效果更好。同时在电压突变时刻,PI 控制下 CL 电压发生较明显的波动,而文中控制策略下 CL 电压波动较小且平滑过度。

(2) 文中所提出的控制策略对系统参数的敏感性较低,NCL 阻值对控制效果有一定的影响,在敏感性分析实验中 CL 电压有效值偏差最大为 0.7 V,偏差率为 0.318%。

(3) PI 控制策略下 ES 能承受电压幅值波动范围为 48.3 V,文中控制策略下 ES 能承受电压幅值波动范围为 101.2 V,提高了 52.9 V。文中的控制策略抗干扰能力更强。

(4) 文中仿真实验仅对网侧电压波动进行了仿真分析,未对其他波动(如频率波动、谐波污染、功率波动等)进行仿真分析。今后将进一步对文中控制策略进行研究和改进。

参考文献:

- [1] 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):1-18,369.
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(1):1-18,369.
- [2] 袁志昌,郭佩乾,刘国伟,等. 新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述[J]. 高电压技术,2020,46(5):1460-1475.
YUAN Zhichang, GUO Peiqian, LIU Guowei, et al. Review on control and protection for renewable energy integration through VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1460-1475.
- [3] HUI S Y, LEE C K, WU F F. Electric springs-a new smart grid

technology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012,3(3): 1552-1561.

- [4] LEE C K, CHAUDHURI B, HUI S Y. Hardware and control implementation of electric springs for stabilizing future smart grid with intermittent renewable energy sources[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(1):18-27.
- [5] TAN S C, LEE C K, HUI S Y. General steady-state analysis and control principle of electric springs with active and reactive power compensations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013,28(8):3958-3969.
- [6] 董丙伟,薛花,胡英俊,等. 基于电力弹簧的可再生能源供电系统电压平稳控制方法[J]. 电测与仪表,2020,57(10):100-107.
DONG Bingwei, XUE Hua, HU Yingjun, et al. Voltage stabilization control method of renewable energy power supply system based on electric spring[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020,57(10):100-107.
- [7] AKHTAR Z, CHAUDHURI B, HUI S Y R. Smart loads for voltage control in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015:1-10.
- [8] 程明,王青松,张建忠. 电力弹簧理论分析与控制器设计[J]. 中国电机工程学报,2015,35(10):2436-2444.
CHENG Ming, WANG Qingsong, ZHANG Jianzhong. Theoretical analysis and controller design of electric springs[J]. Proceedings of the CSEE, 2015,35(10):2436-2444.
- [9] 尹发根,王淳. 电力弹簧研究进展:原理、拓扑结构、控制和应用[J]. 电网技术,2019,43(1):174-184.
YIN Fagen, WANG Chun. Review of electric spring: principle, topologies, control and applications[J]. Power System Technology, 2019,43(1):174-184.
- [10] 吴捷,王宝华. 基于最优比例积分的电力弹簧控制器设计[J]. 电气自动化,2017,39(4):39-43.
WU Jie, WANG Baohua. Design of an electric spring controller based on optimal PI[J]. Electrical Automation, 2017,39(4): 39-43.
- [11] SHUO Y, TAN S C, LEE C K, et al. Electric spring for power quality improvement[C]//2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014. Fort Worth, TX, USA. IEEE, 2014:2140-2147.
- [12] 鲍克勤,吴浩强,程启明,等. 基于 E-L 模型的电力弹簧无源控制策略[J]. 高电压技术,2022,48(12):4986-4995.
BAO Keqin, WU Haoqiang, CHENG Qiming, et al. Passive-based control strategy of electric springs based on E-L model[J]. High Voltage Engineering, 2022,48(12):4986-4995.
- [13] WANG Q S, CHENG M, CHEN Z, et al. Steady-state analysis of electric springs with a novel δ control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015,30(12):7159-7169.
- [14] MOK K T, TAN S C, RON HUI S Y. Decoupled power angle and voltage control of electric springs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016,31(2):1216-1229.
- [15] 赵科洪,于金飞,刘加朋,等. 永磁同步电动机指令滤波离

- 散容错控制[J/OL]. 控制工程, 1-7[2023-12-03]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20220761>.
- ZHAO Keqi, YU Jinfei, LIU Jiapeng, et al. Discrete fault tolerant control of permanent magnet synchronous motor via command filtering [J/OL]. Control Engineering of China; 1-7 [2023-12-03]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.2022-0761>.
- [16] EL MAJDOUB K, GIRI F, CHAOUI F Z. Adaptive backstepping control design for semi-active suspension of half-vehicle with magnetorheological damper[J]. CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(3):582-596.
- [17] STOLZLE M, DELLA SANTINA C. Piston-driven pneumatically-actuated soft robots; modeling and backstepping control[J]. IEEE Control Systems Letters, 2022, 6:1837-1842.
- [18] ELIKER K, ZHANG W D. Finite-time adaptive integral backstepping fast terminal sliding mode control application on quadrotor UAV [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2020, 18(2):415-430.
- [19] TONG S C, LI Y M, SHI P. Observer-based adaptive fuzzy backstepping output feedback control of uncertain MIMO pure-feedback nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2012, 20(4):771-785.
- [20] BINH N T, TUNG N A, NAM D P, et al. An adaptive backstepping trajectory tracking control of a tractor trailer wheeled mobile robot[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2019, 17(2):465-473.
- [21] 张加伟, 于金鹏, 刘加朋, 等. 基于观测器的异步电动机指令滤波离散控制[J]. 控制工程, 2023, 30(10):1891-1899.
- ZHANG Jiawei, YU Jinpeng, LIU Jiapeng, et al. Observer-based command filtered discrete-time control for induction motor[J]. Control Engineering of China, 2023, 30(10):1891-1899.
- [22] 王青松. 电力弹簧若干关键技术研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
- WANG Qingsong. Research on key issues of electric springs [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [23] 路遥. 基于跟踪微分器的高超声速飞行器 Backstepping 控制[J]. 航空学报, 2021, 42(11):524737.
- LU Yao. Backstepping control for hypersonic flight vehicles based on tracking differentiator[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(11):524737.
- [24] CHAUDHURI N R, LEE C K, CHAUDHURI B, et al. Dynamic modeling of electric springs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5):2450-2458.
- [25] 詹俊. 电气弹簧若干关键技术的研究[D]. 上海:上海电机学院, 2018.
- ZHAN Jun. Research on key technology of electric spring [D]. Shanghai: Shanghai Dianji University, 2018.

作者简介:



杨成顺

杨成顺(1984),男,博士,副教授,研究方向为新能源系统优化运行与先进控制方法(E-mail: yangchengshun@126.com);

韩通润(1998),男,硕士在读,研究方向为电力弹簧控制及其在电力系统中的应用;

许德智(1985),男,博士,教授,研究方向为故障诊断和容错控制、电机控制以及智能电网。

Backstepping control for electric spring system with command filtering

YANG Chengshun¹, HAN Tongrun¹, XU Dezhi², DAI Yuchen³, HUANG Xiaoning¹

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

3. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming at the voltage fluctuation problem caused by indirectness and uncertainty in new energy power generation system, the backstepping control strategy is firstly applied in electric spring (ES) system, and an ES backstepping control strategy with command filtering is proposed. According to the mathematical model of ES, the controller is designed by backstepping method and command filter is added to solve the computational inflation problem in ES backstepping control. Meanwhile, the error compensation signal is designed, and the stability of the system is verified by the Lyapunov stability theory. The effect of ES on critical load (CL) voltage stabilization is simulated when the grid-side voltage of the new energy power generation system fluctuates, and the sensitivity analysis of different system parameters to the control strategy is discussed in this paper. Compared with traditional proportional integral (PI) control, the dynamic response speed of CL voltage is improved by 0.07 s, while the CL voltage distortion rate is reduced by 31%. In parameter sensitivity analysis, the maximum deviation rate of CL voltage is 0.318%. Meanwhile, the maximum voltage amplitude fluctuation range that it can withstand is increased by 52.9 V. It is verified that the control strategy proposed in this paper has the advantages of fast response, low harmonic content and strong anti-interference ability.

Keywords: new energy power generation system; electric spring (ES); command filtering; backstepping control; critical load (CL); voltage fluctuations; sensitivity analysis

(编辑 吴昊)