

基于无模型自适应控制的电力弹簧电压控制

陈泓韬 秦一丹 杨成顺 黄宵宁

(南京工程学院, 南京 211100)

摘要 针对新能源发电的间歇性和不确定性导致电力弹簧 (ES) 系统模型参数变化及控制性能降低的问题, 本文提出一种应用于 ES 系统的无模型自适应控制 (MFAC) 策略, 仅使用 ES 的输入输出数据实时更新控制律方程和伪偏导数估计方程, 通过紧格式动态线性化算法将 ES 的输入输出数据描述为紧格式线性化数据模型来替代 ES 的非线性系统, 从而实现 ES 的无模型自适应控制。通过 Matlab/Simulink 仿真模拟 ES 系统的电压稳定效果。结果表明, 与传统的比例积分 (PI) 控制相比, 电压稳定响应速度提升了 0.07s, 电压波形畸变率降低了 6.43 个百分点, 验证了本文所提控制策略的优越性。

关键词: 电力弹簧 (ES); 无模型自适应控制 (MFAC); 紧格式动态线性化; 比例积分 (PI) 控制; 稳定电压

Research on voltage control of electric spring based on model-free adaptive control

CHEN Hongtao QIN Yidan YANG Chengshun HUANG Xiaoning

(Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211100)

Abstract In response to the intermittency and uncertainty of renewable energy generation, which leads to changes in the model parameters of the electric spring (ES) system and a decrease in control performance, this paper proposes a model-free adaptive control (MFAC) strategy applied to the ES system. This strategy involves updating the control law equation and pseudo-derivative estimation equation in real-time using only the input-output data of ES. Through the compact form dynamic linearization algorithm, the input-output data of ES is described as a compact form dynamic linearization data model to replace the non-linear system of ES, thus achieving model-free adaptive control of ES. To verify the superiority of the control strategy proposed in this paper, the voltage stabilisation effect of the ES system is simulated by Matlab/Simulink. The results show that the voltage stabilisation response speed is improved by 0.07s, and the voltage waveform distortion rate is reduced by 6.43%, compared with the traditional proportional integral (PI) control strategy.

Keywords: electric spring (ES); model-free adaptive control (MFAC); compact form dynamic linearization; proportional integral (PI) controllers; stable voltage

0 引言

光伏、风电等可再生能源 (renewable energy source, RES) 在电力系统中的占比不断升高, 在构建新能源发电体系的背景下, 能源绿色低碳转型稳步推进^[1]。然而, 当大规模的 RES 接入电网时, 由于新能源发电的间歇性、随机性, 电网的电能质量和稳定性都会受到影响, 主要表现在电压、频率波

动, 以及谐波污染等^[2-3]。为解决上述问题, 研究人员提出了需求侧管理模式, 使电力需求跟随电力供应进而达到供需平衡。香港大学的许树源团队于 2012 年在机械弹簧的基础上, 创新性地提出了电力弹簧 (electric spring, ES) 的概念^[4]。在 ES 理论中, 负载被分为关键负载 (critical load, CL) 与非关键负载 (non-critical load, NCL), 以关键负载的电压稳定为主要控制目标, NCL 与 ES 串联构成的智能负

载 (smart load, SL) 承担新能源发电系统产生的不稳定的电压波动, 以增强电网对新能源发电的消纳能力。

目前, 针对 ES 的研究不断深入, ES 的拓扑结构及其控制策略种类繁多。在 ES 的拓扑结构研究方面, 文献[5]总结了 ES 的多种拓扑结构, ES-1 型是最早被提出的 ES 拓扑结构, 其逆变器直流侧为电容, 故只能工作在不功补偿模式, 通过纯无功补偿将电压波动转移至 NCL。ES-2 型将 ES-1 型的直流侧更换为储能装置后可实现更多的工作模式和更宽的工作范围^[6], 故本文研究均基于 ES-2 型。在 ES 的控制策略研究方面, 目前仍以传统的比例积分 (proportional integral, PI) 控制为主。文献[7]提出 PI 控制, 在该控制方法中, SL 的相位不可控, 参考电压跟踪效果欠佳。文献[8]将 SL 的电流相位引入 PI 控制中, 实现了更精确的参考电压跟踪, 但是该 PI 控制方法下的 CL 谐波含量较高。文献[9]提出一种基于相位控制的准比例谐振 (proportional resonant, PR) 控制器, 其控制过程的物理意义明确, 但 ES 属于非线性系统, 外部参数变化和扰动对该控制方法的影响较大。文献[10]提出一种改进型模型预测控制策略, 具有优异的鲁棒性, 响应快速。文献[11]针对变换器提出一种基于前馈解耦的电压电流双环控制策略, 实现了变换器 dq 轴的功率解耦。文献[12]为并网变换器应用了一种基于模糊控制和虚拟同步机控制相结合的控制策略, 有效地增强了系统的惯性及稳定性。上述控制策略的性能依赖模型建立的准确性, 但 ES 属于典型的多变量、强耦合、非线性系统, 现有的传统控制策略存在对模型精确度依赖过高、谐波抑制效果较差等缺点。

由于新能源发电具有不确定和随机性, 无法精确得到电力弹簧系统模型。侯忠生等^[13]提出无模型自适应控制 (model-free adaptive control, MFAC), 利用动态线性化算法, 将非线性系统逼近为一个离散时间的线性化系统。文献[14]仅使用系统所产生的输入输出数据实现了对逆变器的无模型自适应控制。文献[15]将无模型自适应预测控制与高阶滑模补偿器相结合, 有效地克服了永磁同步电机控制系统鲁棒性弱的问题及抖振现象。文献[16]将 MFAC 应用于配电网的电压控制, 解决了难以精确建立配电网电压控制模型的问题。MFAC 的主要优势在于能够应对系统的不确定性和非线性, 无需精确的数学模型, 从而提供一个具有高度适应性和精确性的控制框架。结合紧格式动态线性化算法, MFAC 在

处理 ES 这样的非线性系统问题时潜力突出。文献[17-19]将 MFAC 应用于风电机组、自动泊车、二维直线电机等领域的控制, 解决了系统模型不够精确的问题。

本文将 MFAC 应用于 ES 的控制中, 仅利用 ES 的单一数据, 通过动态线性化算法描述为紧格式动态线性化数据模型, 无需系统的精确模型, 并且实时更新控制律方程和伪偏导数估计方程, 实现对参考电压的精确跟踪。最后, 通过仿真验证其在支持电压稳定方面的可行性, 并与传统 PI 控制进行对比, 突出其优越性。

1 电力弹簧的数学模型

ES 作为一种需求侧管理设备, 颠覆了用电需求决定发电量的传统思路, 使用电量跟随发电量变化而变化。因此, 将负载分为两大类: 一类是 CL, 如军事基地、医院等关键场所的高精度仪器设备, 对电压稳定性要求较高; 另一类是 NCL, 如照明系统、家用电器等, 其可以承受较大范围的电压波动。电力弹簧系统拓扑结构如图 1 所示, 其中 U_{dc} 为逆变器直流侧蓄电池电压, 电感 L 和电容 C 组成滤波器, U_{AB} 为逆变器输出端电压, I_L 为逆变器输出电流, U_{ES} 为 ES 的输出电压即电容 C 上的电压, U_{CL} 与 U_{NCL} 分别为关键负载电压与非关键负载电压, U_G 为网侧电压, I_1 、 I_2 、 I_3 分别为流经线路、CL 和 NCL 的电流, Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别为传输线阻抗、CL 阻抗和 NCL 阻抗, L_1 为传输线电感, R_1 为传输线电阻。

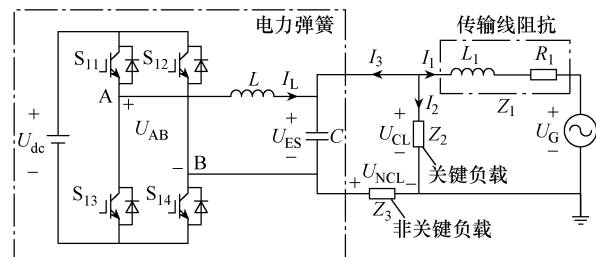


图 1 电力弹簧系统拓扑结构

根据文献[6]可知 ES 的状态方程为

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{U_{AB}}{L} - \frac{U_{ES}}{L} \\ \frac{dU_{ES}}{dt} = \frac{I_L}{C} + \frac{I_3}{C} \\ \frac{dI_1}{dt} = \frac{U_G}{L_1} - \frac{U_{ES}Z_2}{L_1(Z_2+Z_3)} - \frac{I_1(Z_1Z_2+Z_2Z_3+Z_3Z_1)}{L_1(Z_2+Z_3)} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{令 } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_L \\ U_{ES} \\ I_1 \end{bmatrix} \text{ 为状态变量, } \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} =$$

$\begin{bmatrix} U_G \\ U_{AB} \end{bmatrix}$ 为系统输入, $y = U_{CL}$ 为系统输出, 忽略扰动和量测噪声, ES 的状态空间方程可以表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ y = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L} & 0 \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{C(Z_2+Z_3)} & \frac{Z_2}{C(Z_2+Z_3)} \\ 0 & \frac{-Z_2}{L_1(Z_2+Z_3)} & \frac{-(Z_1Z_2+Z_2Z_3+Z_3Z_1)}{L_1(Z_2+Z_3)} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{L_1} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{Z_2}{Z_2+Z_3} & \frac{Z_2Z_3}{Z_2+Z_3} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = [0 \quad 0]$$

由 ES 系统的状态空间方程可以看出, ES 系统是一个双输入单输出的系统, 不易控制。在系统输入中 DC-AC 逆变器端电压 \dot{U}_{AB} 确定的情况下有唯一对应 \dot{U}_G 。

$$\begin{cases} \dot{i}_1 = \frac{\dot{U}_G - \dot{U}_{CL}}{Z_1} \\ \dot{i}_2 = \frac{\dot{U}_{CL}}{Z_2} \\ \dot{i}_3 = \dot{i}_1 - \dot{i}_2 = \frac{\dot{U}_G - \dot{U}_{CL}}{Z_1} - \frac{\dot{U}_{CL}}{Z_2} \end{cases} \quad (3)$$

ES 的电压与逆变器端电压可分别表示为

$$\dot{U}_{ES} = (\dot{i}_3 + \dot{i}_L) \frac{1}{j\omega C} \quad (4)$$

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ES} + \dot{i}_L \cdot j\omega L \quad (5)$$

将式 (3) 和式 (4) 代入式 (5) 后可得

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} = & \dot{U}_{CL} - \left(\frac{\dot{U}_G - \dot{U}_{CL}}{Z_1} - \frac{\dot{U}_{CL}}{Z_2} \right) Z_3 - \\ & \left[\dot{U}_{CL} - \left(\frac{\dot{U}_G - \dot{U}_{CL}}{Z_1} - \frac{\dot{U}_{CL}}{Z_2} \right) Z_3 - \right. \\ & \left. \left(\frac{\dot{U}_G - \dot{U}_{CL}}{Z_1} - \frac{\dot{U}_{CL}}{Z_2} \right) \frac{1}{j\omega C} \right] \omega^2 CL \quad (6) \end{aligned}$$

由式 (3) ~ 式 (6) 可知, U_{AB} 与 U_G 存在确定的对应关系, 因此可以把网侧电压项当作扰动项来考虑, 或者忽略网侧项, 将 ES 系统看作一个单输入单输出系统。ES 的传递函数为

$$\begin{aligned} U_{ES}(s) = & \frac{Z' - Z_3}{Z'LCs^2 + Ls + Z'} U_{AB}(s) + \\ & \frac{Z_3LCs^2 + Ls + Z_3}{Z'LCs^2 + Ls + Z'} \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} U_G(s) \quad (7) \end{aligned}$$

式中, $Z' = \frac{Z_1Z_2 + Z_2Z_3 + Z_3Z_1}{Z_1 + Z_2}$ 。代入相应数据^[9]得

$$\begin{aligned} U_{ES}(s) = & \frac{0.35s + 20}{9.17 \times 10^{-7}s^3 + 2.89 \times 10^{-3}s^2 + 1.17s + 1222.4} U_{AB}(s) + \\ & \frac{3.37 \times 10^{-4}s^2 + 9.36 \times 10^{-2}s + 144}{9.17 \times 10^{-7}s^3 + 2.89 \times 10^{-3}s^2 + 1.17s + 1222.4} U_G(s) \quad (8) \end{aligned}$$

根据式 (8) 在 MFAC 仿真设计中将逆变器端电压项作为系统项, 网侧电压项作为扰动项加入系统输出, 以此解决双输入单输出系统不易控制的问题, 同时保留网侧电压项的存在, 以方便完成对不同网侧电压情况的仿真。

2 基于紧格式动态线性化的无模型自适应控制

针对 ES 这种强耦合非线性系统, MFAC 摒弃了对被控系统机理模型和参数的精确需求, 转而使用输入输出 (input output, IO) 数据, 通过动态线性化算法来描述非线性系统, 动态更新系统的控制律和伪偏导数, 从而确保 ES 系统面对网侧电压波动时, 能够实现高效、稳定的 CL 电压控制。

本文选用计算量较小的紧格式动态线性化算法, 将 ES 系统看作一个单输入单输出系统, 写成如式 (9) 所示一般离散时间非线性系统。

$$y(k+1) = f\left(y(k), \dots, y(k-n_y), u(k), \dots, u(k-m_u)\right) \quad (9)$$

式中： $y(k)$ 为实际 CL 电压； $u(k)$ 为逆变器端电压输入； n_y 为输出的阶数； m_u 为输入的阶数； $f(\cdot)$ 为未知的非线性函数。

其控制律更新方程为

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho \delta(k)}{\lambda + \delta^2(k)} (y_e(k+1) - y(k)) \quad (10)$$

式中： ρ 为电压步长因子，使算法更具一般性，调节系统响应的幅度； λ 为电压权重因子，用来限制逆变器电压的输入，调节系统响应速度； $\delta(k)$ 为伪偏导数（pseudo partial derivative, PPD）； $y_e(k)$ 为期望的 CL 电压。

令非线性系统中

$$\begin{cases} \Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \\ \Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k) \end{cases} \quad (11)$$

当 $\Delta u(k) \neq 0$ 时，一定存在一个伪偏导数 $\delta(k)$ 使式 (10) 和式 (12) 成立。

$$\Delta y(k+1) = \delta(k) \Delta u(k) \quad (12)$$

$\delta(k)$ 的估计算法为

$$\delta(k) = \delta(k-1) + \frac{\eta \Delta u(k-1)}{\mu + (\Delta u(k-1))^2} [\Delta y(k) - \hat{\delta}(k-1) \Delta u(k-1)] \quad (13)$$

式中： η 为伪偏导数步长因子； μ 为伪偏导数权重因子，同时避免了分母为 0 的情况； $\hat{\delta}(k)$ 为 $\delta(k)$ 的估计值。

当 $|\hat{\delta}(k)| \leq \varepsilon$ 或 $|\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon$ 或 $\text{sign}[\hat{\delta}(k)] \neq \text{sign}[\hat{\delta}(1)]$ 时， $\hat{\delta}(k) = \hat{\delta}(1)$ ，其中 $\hat{\delta}(1)$ 为伪偏导数的初值， ε 为一个充分小的正数。具体推导证明及定理参考文献[8]，本文不再进行详细描述。

由伪偏导数估计方程式 (13) 和控制律更新方程式 (10) 可得到 MFAC 的主要控制结构，且不需要受控模型的具体参数，仅利用了输入输出数据。MFAC 系统框图如图 2 所示。

3 仿真研究与对比

为验证本文所提控制策略的有效性及其优越性，在 Matlab/Simulink 对 ES 进行无功补偿的电压稳定仿真分析。分别对同一被控对象 ES 使用 PI 控制和 MFAC，设置 3 组试验进行对比分析。

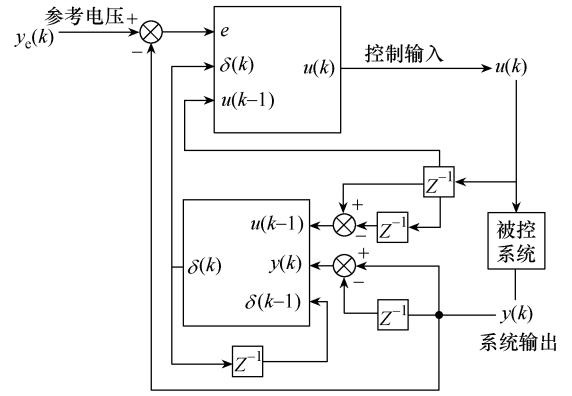


图 2 MFAC 系统框图

根据图 3 所示 ES 控制系统框图在 Simulink 中搭建 ES 的仿真模型，仿真模式设置为离散模式，采样时间 $T_s = 5 \times 10^{-5} \text{s}$ 。ES 系统的模型参数见表 1。

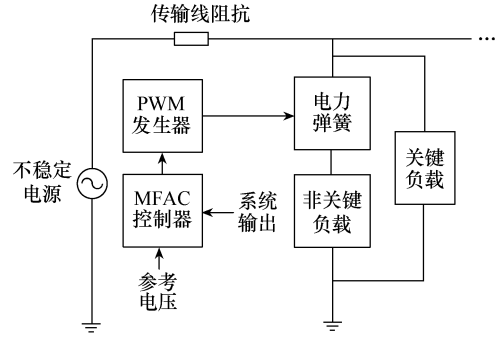


图 3 ES 控制系统框图

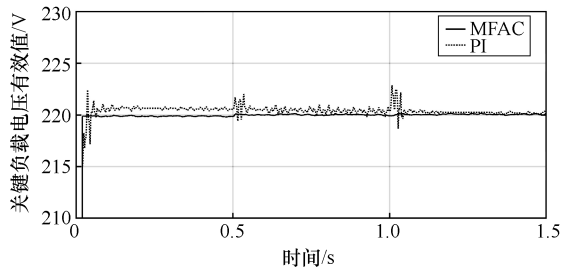
表 1 ES 系统模型参数

参数	数值
逆变器直流侧电压 U_{dc}/V	200
传输线电阻值 R_1/Ω	0.2
传输线电感值 L_1/mH	3.5
CL 电阻值 R_2/Ω	100
NCL 电阻值 R_3/Ω	12
低通滤波器电感值 L/mH	7.8
低通滤波器电容值 $C/\mu\text{F}$	300
电网频率/Hz	50

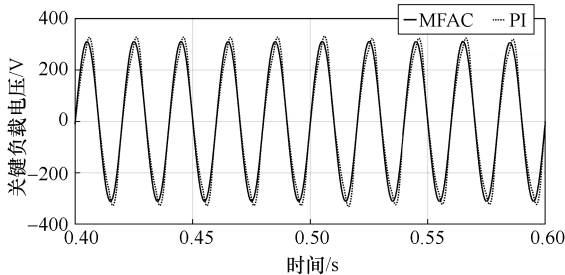
试验一：试验一工况设计较为复杂，整个仿真过程分为三个阶段。阶段一，0~0.5s 网侧电压 U_G 低于标准电压运行，幅值设定为 300V。阶段二，0.5~1s 网侧电压 U_G 略高于标准电压运行，幅值设定为 320V。阶段三，1~1.5s 网侧电压 U_G 高于标准电压运行，幅值设定为 334V。

试验一仿真结果如图 4 所示，其中图 4 (a) 为 CL 电压有效值波形，图 4 (b) 为 CL 电压波形。从

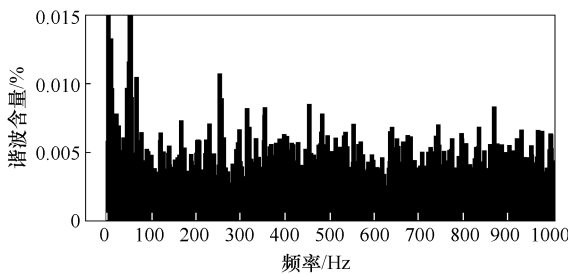
图 4 (a) 和图 4 (b) 可以看出, 相比于 PI 控制策略, MFAC 的 CL 电压稳定速度提升了 0.07s。在 0.5s 和 1s 网侧电压波动时, PI 控制策略下的 CL 电压出现了较大的抖振, 并且出现了较大的超调量, MFAC 策略下并未出现明显的电压波动。图 4 (c) 和图 4 (d) 分别为 MFAC 与 PI 控制策略下的快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 波形, 其中谐波含量为 CL 电压失真波形幅值的最大值减去最小值后与标准基波最大值减去最小值的比值, MFAC 策略下的电压波形畸变率为 0.53%, 与 PI 控制的电压波形畸变率 6.96% 相比, 提升了 6.43 个百分点。



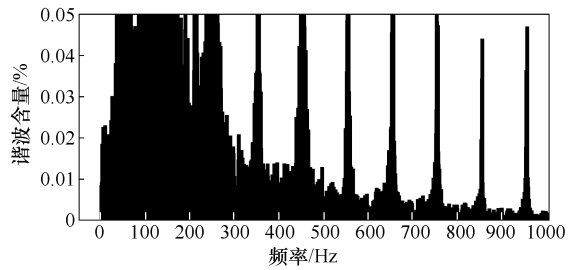
(a) CL 电压有效值波形



(b) CL 电压波形



(c) MFAC 策略 FFT 波形



(d) PI 控制策略 FFT 波形

图 4 试验一仿真结果

图 5 为 MFAC 策略下的 NCL 功率变化波形, 当网侧电压波动时, ES 将 CL 所承受的能量波动有效转移至 NCL。

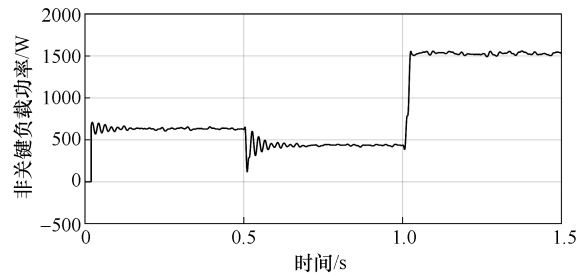
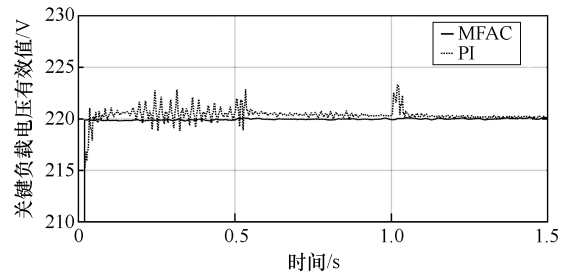


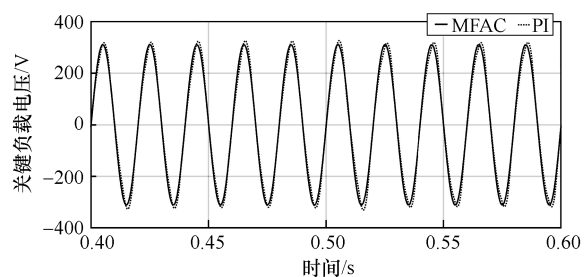
图 5 MFAC 策略下的 NCL 功率变化波形

综上所述, 相比于 PI 控制, 本文所提的 MFAC 策略提高了控制器的响应速度, 降低了 CL 电压稳定所需时间及超调量, 谐波含量减少 6.43 个百分点, 波形畸变率更低, 有效地稳定了 CL 电压。

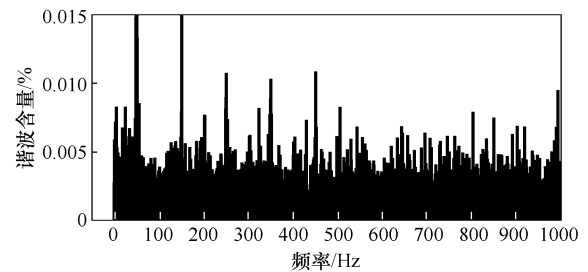
试验二: 为验证系统模型参数变化对 MFAC 策略的影响, 保留试验一的电压波动设置, 同时将 NCL 的阻值调整为 20Ω 。试验二仿真结果如图 6 所示。



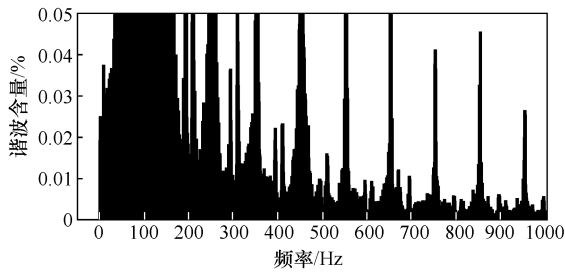
(a) CL 电压有效值波形



(b) CL 电压波形



(c) MFAC 策略 FFT 波形



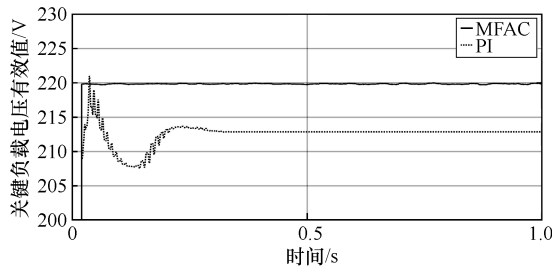
(d) PI 控制策略 FFT 波形

图 6 试验二仿真结果

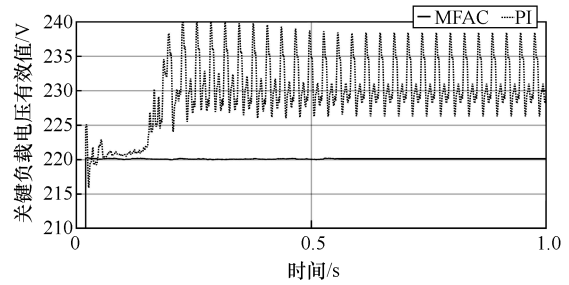
由图 6 可知,当 NCL 阻值变化时, MFAC 有效地稳定了 CL 电压,未出现明显波动,而 PI 控制下的 CL 电压出现了较大的抖振和超调量。同时, PI 控制下的电压波形畸变率上升至 10.60%, MFAC 策略下的 CL 电压波形畸变率为 0.58%,相比于 NCL 没有变化时并未出现较大的电压波形畸变。结果表明,当 NCL 变化时, MFAC 策略下的 CL 电压稳定效果优于 PI 控制;相比于 PI 控制, MFAC 策略下的电压波形畸变率降低了 10.02 个百分点,验证了本文所提 MFAC 策略对系统参数变化的不敏感性。

试验三:为比较两种控制方式下 ES 能承受的网侧电压波动,本次试验保持试验一的系统参数设置,仿真时间调整为 1s,通过不断改变网侧电压的幅值来测试两种控制策略下 ES 所能承受电压波动的临界范围。

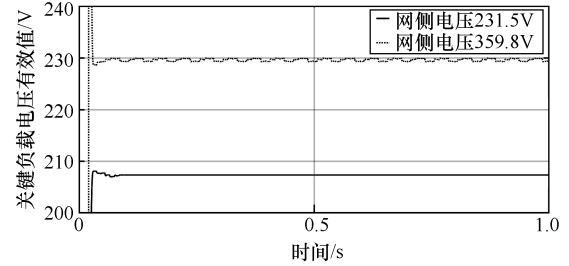
试验三仿真结果如图 7 所示,其中图 7(a)和图 7(b)分别为网侧电压幅值为 289.91V 及 335.74V 时,两种控制策略下的 CL 电压有效值波形,图 7(c)为网侧电压幅值为 231.5V 和 359.8V 时 MFAC 下的 CL 电压有效值波形。经过试验分析可知,PI 控制策略下 ES 系统所能承受的最大网侧电压波动范围为 289.91~335.74V; MFAC 策略下 ES 系统所能承受的最大网侧电压波动范围为 231.5~359.8V。因此,在本文所提控制策略下,ES 系统具有更大的电压波动承受范围,比 PI 控制策略下的临界范围扩大了 82.47V,使系统具有更强的抗干扰能力。



(a) 网侧电压为 289.91V 时 CL 电压有效值波形



(b) 网侧电压为 335.74V 时 CL 电压有效值波形



(c) 网侧电压临界时 MFAC 下 CL 电压有效值波形

图 7 试验三仿真结果

4 结论

本文提出了一种基于无模型自适应控制的电力弹簧控制策略,结合新能源发电系统,模拟新能源发电过程中出现的间歇性和不确定性导致的电压波动问题。通过理论分析和控制器设计,以及仿真试验证明了 MFAC 策略的优越性,得出以下结论:

1) 在新能源发电系统网侧电压波动时,相比于 PI 控制, MFAC 使电压稳定速度加快了 0.07s,控制器响应速度更快;波形畸变率降低了 6.43 个百分点,电能质量更好;网侧电压突变时刻抖振较小且平滑过渡。

2) 本文所提 MFAC 策略对系统参数变化的敏感性较低。在非关键负载变化试验中, PI 控制下的 CL 电压出现了较大的抖振,且超调量达到 3.6V, MFAC 下的 CL 电压并未出现明显抖振,电压波形畸变率与试验一中相比仅上升了 0.05 个百分点。

3) 在网侧电压波动范围试验中, PI 控制策略下, ES 系统所能承受的电压波动范围为 45.83V, MFAC 策略下 ES 系统所能承受的电压波动范围为 128.3V,范围扩大了 82.47V,因此本文所提控制策略使 ES 系统的工作范围更大,抗干扰能力更强。

4) 本文仿真试验仅针对网侧电压的波动进行仿真分析,并未深入分析频率波动、谐波污染及功率波动等问题,后续将在以上方面进行更深入的研究与改进。

参考文献

- [1] 丁俊, 王欣怡, 邵焯楠, 等. 新型电力系统的影响因素分析[J]. 电气技术, 2022, 23(7): 42-45.
- [2] 李春敏, 吴亚洲. 新能源接入对电网安全稳定的影响思考[J]. 应用能源技术, 2022(8): 58-61.
- [3] 夏得青, 向星宇, 李宽龙, 等. 农村配电网低电压治理研究进展[J]. 电气技术, 2023, 24(6): 1-5.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 尹发根, 王淳. 基于无功补偿的电力弹簧有效运行范围分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 9-16.
- [7] 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.
- [8] LI Dai, HOU Zhongsheng. Perimeter control of urban traffic networks based on model-free adaptive control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(10): 6460-6472.
- [9] 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.
- [10] 陈隆, 周扬忠. 一种基于虚拟矢量的 T 型三电平并网逆变器改进型模型预测控制策略[J]. 电气技术, 2022, 23(11): 37-43.
- [11] 姚卫波, 徐晔, 黄克峰, 等. 基于前馈解耦的交直流混合微电网双向 AC-DC 变换器控制策略研究[J]. 电气技术, 2022, 23(5): 25-33.
- [12] 胡石阳, 刘国荣. 基于虚拟同步机的新能源并网智能控制研究[J]. 电气技术, 2022, 23(10): 10-17.
- [13] 侯忠生, 金尚泰. 无模型自适应控制: 理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [14] 李振轩, 李红飞, 张怡龙, 等. 基于无模型自适应控制的电力逆变器控制系统设计[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 114-120.
- [15] 刘慧博, 张翀, 黄前柱. 永磁同步电机无模型自适应滑模补偿预测控制[J]. 机械设计与制造, 2024(4): 165-171.
- [16] 潘俊迪, 陈中, 倪纯奕, 等. 基于无模型自适应控制的配电网电压控制方案[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 128-137.
- [17] 漆良文, 石可重, 郭乃志, 等. 漂浮式风电机组无模型自适应控制[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 384-390.
- [18] 王文佳, 侯忠生. 基于无模型自适应控制的自动泊车方案[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 2056-2066.
- [19] 曾子强, 曹荣敏, 侯忠生, 等. 二维直线电机的多入多出无模型自适应轮廓控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(5): 1007-1017.
- [18] 代亚杰. 基于傅里叶变换和小波变换的电能质量谐波检测及扰动分析[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [19] 高海洋, 王玮, 尚同同, 等. 基于小波能谱熵的串联型故障电弧检测方法[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(12): 63-71.
- [20] 邹丹丹, 项成恩, 廖昊爽, 等. 基于小波能谱熵和 PSO-SVM 的输电线路故障类型识别[C]//2022 年江西省电机工程学会年会论文集, 南昌, 2022.
- [21] 梁睿, 彭楠, 张政一, 等. 暂态特征模量时频分析的电缆型配电网单相接地故障区段定位[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9098-9114.
- [22] 张才庆, 王铭, 李潘, 等. 基于能量特征的配电网接地故障暂态选线方法研究[J]. 节能, 2021, 40(9): 68-71.

(上接第 41 页)

收稿日期: 2024-08-15

修回日期: 2024-09-18

作者简介

陈泓楠(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网运行与控制技术。

收稿日期: 2024-08-16

修回日期: 2024-11-01

作者简介

王良锋(2002—), 男, 广东茂名人, 本科生, 研究方向为 AI 在智能配电网领域的应用。