

基于改进自抗扰控制的非对称六相双永磁同步电机串联系统控制

霍思佳¹, 崔昊杨¹, 巨思远², 秦伦明¹

(1. 上海电力大学 电子与信息工程学院, 上海 200090;

2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对 PI 控制器存在的超调及跟踪速度慢的问题, 以非对称六相永磁同步电机 (PMSM) 双电机串联系统为研究对象, 采用自抗扰控制 (ADRC) 替代传统 PI 控制进行速度补偿, 提高系统的抗干扰能力。基于传统自抗扰模块多参数整定的复杂性, 引入遗传算法对其参数寻优, 以最小超调量为优化判据通过交叉迭代的方式改进 ADRC 调节器。搭建基于改进 ADRC 的非对称六相双 PMSM 串联系统, 并进行仿真。结果表明: 与传统 PI 控制相比较, 所用方法具备快速调节性能和精确的跟踪效果, 同时可以削弱谐波电流的影响和转矩脉动, 验证了所提控制策略的实用性。

关键词: 改进自抗扰控制; 串联电机; 非对称六相永磁同步电机; 速度超调

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)02-0020-05

Control of Asymmetric Six-Phase Dual Permanent Magnet Synchronous Motor Series System Based on Improved ADRC

HUO Sijia¹, CUI Haoyang¹, JU Siyuan², QIN Lunming¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: When using PI controller, overshoot of speed was prone to occur during the motor startup process. To solve the problems of overshoot and slow tracking in the startup process of series multiphase motor system, an improved active disturbance rejection controller (ADRC) to substitute PI controller in the series system of asymmetric six-phase dual permanent magnet synchronous motors (PMSMs) was studied. Then, the genetic algorithm was introduced to optimize the module parameter of proposed method by optimization criterion of minimum overshoot. Finally, an asymmetric six-phase dual PMSM series system based on improved ADRC was built in MATLAB/Simulink. The simulation results showed that the method used had fast adjustment and accurate tracking effect, compared with the traditional PI control. In the meantime, the influence of harmonic current and torque ripple could be well weakened. All of these verified the practicability of this control strategy.

Key words: improved active disturbance rejection control; series motors; asymmetric six-phase permanent magnet synchronous motor; overshoot of speed

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61107081); 上海市地方能力建设项目(15110500900, 14110500900)

作者简介: 霍思佳(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为多相电机控制。

崔昊杨(1978—), 男, 教授, 研究方向为红外探测材料与器件、电气设备红外诊断与状态检测等。

巨思远(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制。

0 引言

航天航空、机车牵引等工业的发展对电机功率、转矩脉动及可靠性提出了更高的要求,多相电机以其大功率密度、高容错性能等优势广泛应用于上述领域^[1]。田家柱等^[2]针对航空高压直流供电系统中的供电要求,研究并验证了以六相永磁同步电机(PMSM)为主体的六相可控整流系统的可行性。作为一个非线性、强耦合的多变量系统,PMSM的控制性能易受系统自身参数变化及外部扰动的影响^[3],因此有必要研究多相 PMSM 的高性能控制策略。考虑到非对称六相 PMSM 的独特结构,其输出的各相电流均趋于正弦且具有较小的转矩脉动,双 Y 移 30° PMSM 两电机串联系统具有更大的应用价值^[4-5]。

学者们对多相电机控制技术及单逆变器驱动的多相串联系统开展了广泛的研究。为了实现更为高效的感知策略,文献[6]利用结合模糊 PID 与观测器的三环控制策略实现了良好的动静态控制,但该方法建模复杂,难以应用于实际工程。文献[7]通过理论分析与仿真,研究速度稳定时的电流环控制策略。文献[8-10]应用自抗扰控制(ADRC)技术辨识 PMSM 系统的速度环参数,取得了良好的跟踪效果。文献[11]将空间矢量脉宽调制(SVPWM)技术替换为零序电流脉宽调制(PWM)模块,并根据比例谐振(PR)调节器的方式对谐波进行抑制以实现控制系统模块简化,同时仍可保持较高的控制效率。但是上述控制策略均只在多相单电机模型上进行研究。对于非对称六相 PMSM 串联系统,文献[12-14]提出了六相串联系统的不同结构,并通过仿真验证了其解耦模型及系统的可行性。文献[15-16]通过矢量调控策略研究并验证了单逆变器驱动的不同负载下的双 Y 移 30° PMSM 串联系统中各电机的独立性。针对直接转矩控制(DTC)存在的桥臂开关控制问题,文献[17]提出非对称六相 PMSM 串联系统的空间矢量调制 DTC(SVM-DTC)算法及其改进方法。上述串联系统所使用的方法在不同程度上提高了整个系统的性能,但是各控制策略均需要依赖精确的电机模型,且控制模块多采用 PI 进行调节,控制性能易受系统内外扰动的影响,不利于广泛应用于实际工程。

本文将不依赖于精确数学模型的 ADRC 引入电机串联系统,建立了基于改进 ADRC^[18-21]的矢量控制系统。通过结合被控 PMSM 的内外扰动和观测到的实时转速对速度环加以补偿,以实现良好且快速的跟踪效果;基于人工参数选取的随机性,以速度误差平方和最小为适应度函数,将其作为优化判据;采用遗传算法(GA)对 ADRC 的待参数进行整定。试验结果证明,本文所用方法在起动速度的调节性及快速性方面取得了良好的效果,同时减弱了谐波效应产生的脉动幅值,实用性较强。

1 非对称六相双 PMSM 串联原理

在静止坐标系,非对称六相 PMSM 是一个六维的非线性强耦合的高阶系统,因此在研究其串联系统时,有必要研究其解耦控制性能^[17]。根据多相电机的串联规则,将 2 台非对称六相 PMSM 定子绕组进行串接可实现解耦控制^[22],如图 1 所示。

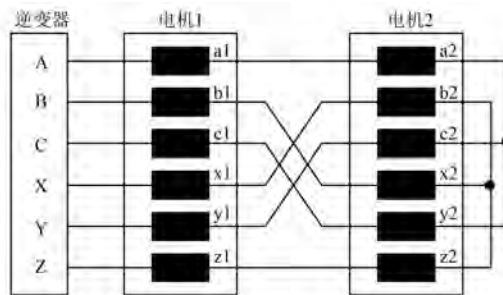


图 1 非对称六相双电机串联方式

该电机串联系统在旋转坐标系下的数学模型如下。

电压及电流方程^[19,21]为

$$U_{dn} = Ri_{dn} + L_{sn} \frac{d}{dt} i_{dn} - \omega_{rn} L_{sn} i_{qn} \quad (1)$$

$$U_{qn} = Ri_{qn} + L_{sn} \frac{d}{dt} i_{qn} + \omega_{rn} L_{sn} i_{dn} + \omega_{rn} \psi_{in} \quad (2)$$

式中： n ——第 n 台电机,且 $n=1,2$;

i_{dn}, i_{qn} —— d - q 轴各相电流;

L_{sn} ——永磁电机定子绕组漏感;

ω_{rn} ——电机转子的角速度;

U_{dn}, U_{qn} —— d - q 轴各相电压;

R ——定子绕组电阻, $R=r_1+r_2$, r_1, r_2 分别为两个电机的定子绕组电阻;

ψ_{ln} ——电机永磁体磁链, $\psi_{ln} = \sqrt{3} N_{sn} \Phi_{lmn}$, N_{sn} 为电机的定子绕组匝数, Φ_{lmn} 为电机永磁体的主磁通。

式(1)、式(2)表明, 2台电机电磁转矩的控制只需要通过控制 i_{q1} 和 i_{q2} 来实现。 i_{q1} 和 i_{q2} 这2个电流分量可以独立调节, 因此该串联驱动系统可以实现解耦控制。其转矩方程表达式^[19, 21]为

$$T_{en} = p \cdot (i_{qn} \times \psi_{ln}) \quad (3)$$

式中: p ——2台电机的极对数。

则机械运动方程为:

$$J_n \frac{d\omega_m}{dt} = T_{en} - F_{en}\omega_m - T_{ln} \quad (4)$$

式中: F_{en} ——2台电机的摩擦因数;

T_{ln} ——电机的负载转矩。

2 基于改进 ADRC 的串联控制系统模型

针对传统直接转矩控制存在的电压矢量选取复杂、PI 控制容易导致超调以及响应速度慢的问题, ADRC 技术采用观测器和系统内外扰动相结合的方式对串联双电机进行控制。其结构如图 2 所示, 包括跟踪-微分器 (TD)、扩张状态观测器 (ESO) 及非线性误差反馈 (NLSEF) 3 个部分^[18]。

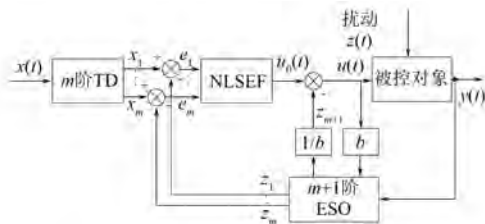


图 2 ADRC 原理示意图

以 2 台非对称六相电机作为被控对象, 引入 2 个 ADRC 分别替代原 PI 控制器。由式(4)可知各个电机的运动方程可以表达为

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J_n} T_{en} - \frac{1}{J_n} (F_{en}\omega_m + T_{ln}) \quad (5)$$

式中: ω_m ——机械角速度, 可通过 ω_m/p 获得。

令 $x = \omega_m$ 为输入信号, $a(t) = -\frac{1}{J_n} (F_{en}\omega_m/p + T_{ln})$ 为系统的内外扰动之和, $b = \frac{1}{J_n}$, $u(t) = T_{en}$ 作为控制量, 则 2 台电机的运动方程[式(5)]可以

用统一的被控模型^[19]表示:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = a(t) + bu(t) \\ y = x \end{cases} \quad (6)$$

式(6)表明串联系统的被控对象为一阶, 将转速的参考值 ω^* 作为非线性 TD 的输入, 则 TD 设计为:

$$\begin{cases} x_1(t+1) = x_1(t) + h x_2(t) \\ x_2(t+1) = x_2(t) + h \cdot \text{fst}_2[x_1(t) - \omega^*, x_2(t), r, h] \end{cases} \quad (7)$$

其中: h 为积分步长, fst_2 为非线性最优控制函数, r 决定速度的跟踪精度, 并且其值的大小与跟踪精度成正比, $x_1(t)$ 为输入信号的跟踪值, $x_2(t)$ 作为跟踪值的微分, 以近似输入信号的方式计算积分步长。通过 PMSM 速度环内的参考转速及其过渡过程控制电机起动时产生的超调现象。

对于 ESO 模块, 以观测对象的输出及设定转矩作为输入, 对系统未知扰动进行估计并加以补偿。其三阶表达式为

$$e = z_1(t) - \omega_r, e_1 = x_1(t) - \omega_r$$

$$z_1(t) = z_1(t) + h[z_2(t) - \beta_{01}e]$$

$$z_2(t) = z_2(t) +$$

$$h[z_3(t) - \beta_{02}\text{fal}(e, 0.5, \delta) + bu(t)]$$

$$z_3(t) = h - \beta_{03}\text{fal}(e_1, 0.25, \delta)$$

$$\text{fal}(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\varepsilon|^\alpha \text{sgn}(\varepsilon), & |\varepsilon| \geq \delta \\ \frac{\varepsilon}{\delta^{1-\alpha}}, & |\varepsilon| < \delta \end{cases} \quad (8)$$

式中: $z_1(t)$ 、 $z_2(t)$ 、 $z_3(t)$ ——未知扰动;

β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} ——输出误差的矫正增益;

δ ——非线性函数的滤波因子, 影响着系统的滤波效果。

为了达到更好的控制性能, ADRC 采用非线性反馈控制替代传统的基于线性加权的 PI 控制, 通过广义误差并结合扰动补偿实现控制量的输出, 如式(9)所示:

$$u_0(t) = \beta \text{fal}(e_1, 0.5, \delta_1) \quad (9)$$

则最终的 ADRC 调节器为:

$$u(t) = u_0(t) - z_3(t)/b \quad (10)$$

基于 ADRC 的 PMSM 控制结构如图 3 所示。

前述建立的控制模型存在 β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 、 β 、 r 、 b 、 h 等 7 个参数需要设置。对于控制器参数的调

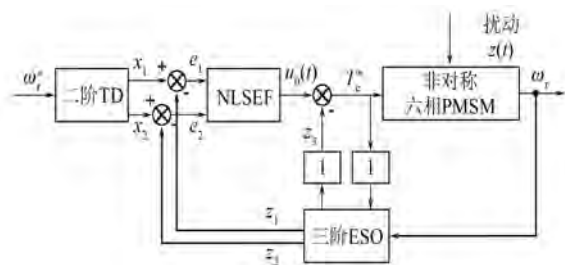


图3 基于ADRC的PMSM控制结构

整,通常采用分离性原理对自抗扰 3 个模块参数分别进行调整^[20],以达到各模块参数最优化,从而满足整个系统的控制性能要求。该方法需要研究人员主观参与仿真与调试,多次设置参数并对比结果,实用性不强。为了实现可调参数的自动优化与效果对比,本文采用遗传算法^[23]对所设计的 ADRC 参数进行寻优整定。

本文以电机起动时速度的超调问题作为决定参数取值的优化判据,即以观测到的速度估计值与设定的速度参考值之间的误差平方和作为适应度函数,如式(11)所示:

$$J_{\min} = \min ER(k) = \min \sum_{i=1}^{i=k} [\omega_r - \omega_r^*]^2 \quad (11)$$

GA 处理的优化问题为最大值问题, 因此式 (11) 可以转换为 $f_{\max} = C - J_{\min}$, 其中, C 为一足够大的正数, 本文取 500 000。令迭代次数为 50, 将 7 个待选参数映射为种群中的染色体, 以上述适应度函数作为迭代停止的条件, 进行交叉迭代, 最终可得串联系统中 ADRC 模块涉及的参数最优值: $\beta_{01} = 10$ 、 $\beta_{02} = 200$ 、 $\beta_{03} = -10$ 、 $\beta = 5$ 、 $r = 50$ 、 $b = 1$ 、 $h = 0.03$ 。

3 仿真与试验

为了验证改进 ADRC 在非对称六相 PMSM 双电机控制系统中的控制效果,利用 MATLAB/Simulink 根据式(1)~式(4)及图 1 的串联规则搭建双电机模块。通过图 3 搭建 ADRC 模块,将参考转速作为输入、转矩作为输出与电机模块进行串接,作为最终的仿真模型,并进行仿真。其中:电机 1 的参数设置如下:额定功率 3 kW、额定电压 220 V、定子内阻 2.875 Ω 、直轴电感 8.5 mH、交轴电感 8.5 mH、电机主磁链 0.175 Wb、转动惯量 0.089 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 、极对数 4、阻

尼系数 0.005; 电机 2 的交直轴电感都为 12 mH、主磁链 0.2 Wb、转动惯量 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、阻尼系数 0.01, 其他参数均与电机 1 相同。

将 2 台非对称六相 PMSM 的工作频率分别设定为 33 Hz 及 20 Hz, 则其对应的转速为 500、300 r/min, 负载转矩分别设置为 10、5 N·m, 仿真结果如图 4~图 7 所示。

图 4(a) 为基于传统 PI 控制的电机 1 转速; 图 4(b) 为基于传统 PI 控制的电机 2 转速。可以看出, 采用传统 PI 算法可实现转速的有效跟踪, 但是 2 台电机跟踪结果均存在超调现象。与传统 PI 控制结果相比, 自抗扰调节器模块不依赖于系统本身参数, 并可利用观测与补偿结合的方式对扰动进行实时补偿, 如图 5 所示。基于改进 ADRC 的控制系统不仅消除了串联双电机的超调现象, 其跟踪时间也分别由 0.05 s 和 0.015 s 减小到 0.01 s 和 0.008 s。

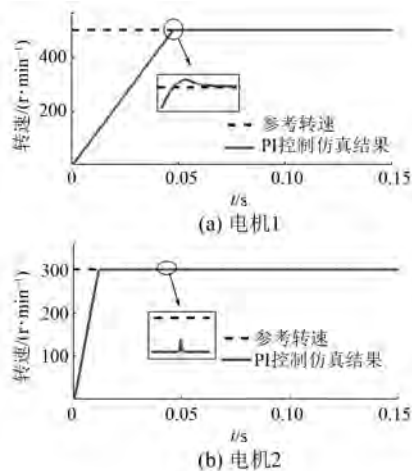


图 4 基于传统 PI 控制的双电机转速及局部放大图

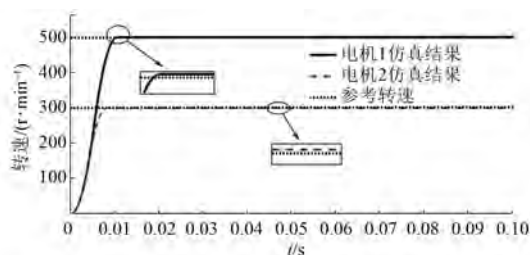


图 5 基于改进 ADRC 的串联 PMSM 转速及局部放大图

如图6所示,基于改进ADRC的双PMSM串联系统输出转矩最终都趋于2台电机各自的负载转矩(即两者互相解耦),且除 $[0.305, 0.355]$ 区间内电

机 2 存在较小的脉动外,在大于 0.15 s 的稳态区域,基本不存在波动现象。因此,基于遗传算法的 ADRC 在一定程度上可以削弱转矩脉动的影响。

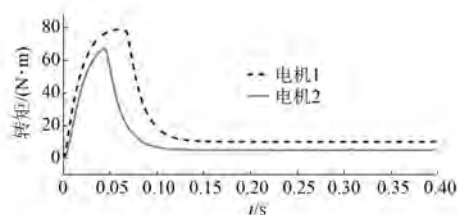


图 6 基于改进 ADRC 的串联 PMSM 输出转矩

为了验证改进系统的稳定性,将 2 台电机的输出电流引入示波器。基于改进 ADRC 控制器的双 PMSM 稳态电流如图 7 所示。从图 7 可以看出,各相电流波形基本接近正弦,即定子的六相电流谐波有所减弱,有益于直流电压利用率的提高。

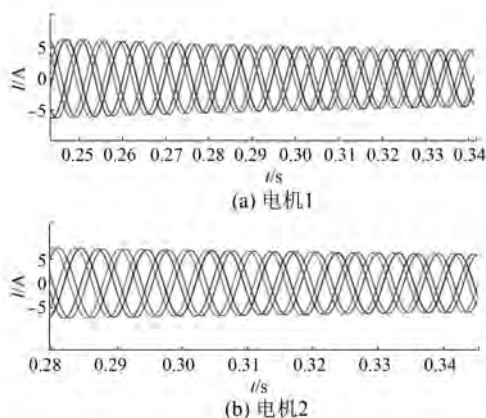


图 7 基于改进 ADRC 的双 PMSM 稳态电流

结果表明,基于遗传算法改进 ADRC 具有良好的跟踪性能,并且可以有效减弱非对称六相双 PMSM 串联控制系统的电流谐波、转矩脉动等影响,相比于传统的控制方式具有更好的应用价值。

4 结 语

针对传统 PI 控制难以满足双电机串联系统中速度的精准控制要求的问题,建立了基于 ADRC 的非对称六相双 PMSM 控制模型。在此基础上,基于 ADRC 控制器多参数整定的复杂性,以速度超调最小作为优化判据,利用遗传算法对系统参数进行改进。仿真结果表明:与传统 PI 控制系统相比,所提出的控制系统可以有效改善系统转速的控制精度和响应速度,提高实时性;减小电

磁转矩的脉动幅值或范围,提高系统的鲁棒性;削弱稳态电流的谐波影响,提高直流电压的利用率。从而,该控制策略实现了串联电机的精准控制,具备较强的实用性。

【参考文献】

- [1] 李贵彬,李永东,郑泽东,等.多相电机统一 SVPWM 调制及无速度传感器控制实现方法研究[J].电机与控制学报,2018,22(1): 61.
- [2] 田家柱,李岩,吴迪.航空高压直流供电系统多相整流控制技术[J].微电机,2018,51(2): 45.
- [3] MOHAMED Y A R I, EI SAADANY E. A current control scheme with an adaptive internal model for torque ripple minimization and robust current regulation in PMSM drive systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 92.
- [4] 张春晓.单逆变器驱动双永磁同步电机串联系统研究[D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [5] 刘陵顺,张少一,刘华崧.双 Y 移 30° PMSM 两电机串联系统的谐波效应[J].电机与控制学报, 2014, 18(7): 72.
- [6] 刘子建,吴敏,陈鑫.永磁同步电机混合非线性控制策略[J].浙江大学学报, 2010, 44(7): 1303.
- [7] 刘露咪,吕振华.PMSM 稳速控制系统中电流环控制策略研究[J].微电机, 2018, 51(3): 37.
- [8] 沈德明,姚冰,祖利辉,等.基于线性自抗扰控制技术的 PMSM 仿真研究[J].控制工程, 2016, 23(增刊): 51.
- [9] 王坤,张立广,王琪.基于改进型粒子群算法的扩张状态观测器[J].国外电子测量技术, 2017, 36(8): 66.
- [10] 韩晔,厉虹.基于改进自抗扰控制的永磁同步电机无传感器系统研究[J].电机与控制应用, 2017, 44(2): 33.
- [11] 徐宏达.双三相永磁同步电机控制策略研究[D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [12] 苗正戈,刘陵顺,张海洋.两个不同结构六相永磁同步电机串联驱动系统[J].电机与控制应用, 2011, 38(7): 17.
- [13] 史贤俊,刘陵顺,周绍磊.基于 SVPWM 的六相 PMSM 串联运行性能研究[J].微电机, 2013, 46(1): 28.
- [14] 韩浩鹏,刘陵顺,张少一.对称六相 PMSM 双电机串联系统直流母线电压利用率的研究[J].船电技术, 2014, 34(2): 6. (下转第 31 页)

- isolated DC/DC converters for distributed power generation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 192.
- [5] TENNER S, HOFMANN W. A comparison of Z-source three-level NPC inverter versus Z-source two-level inverter [C] // IEEE Conference on Emobility-Electrical Power Train, 2010.
- [6] 王菲, 王勇, 傅旻帆. 新能源并网三电平逆变器中低功率区间效率优化 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 101.
- [7] 宋文祥, 陈国呈, 武慧, 等. 一种具有中点电位平衡功能的三电平空间矢量调制方法及其实现 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 95.
- [8] 陈仲, 许亚明, 那显龙. 基于中点电流的三电平 NPC 逆变器电容电压均衡控制分析 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5308.
- [9] MARTIN S, STEFFEN B, JULIAN W, et al. Adaptive closed-loop state control system for a three-level neutral-point-clamped Z-source inverter [J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2016, 6(1): 12.
- [10] LOH P C, GAO F, BLAABJERG F. Topological and modulation design of three-level Z-source inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2268.
- [11] 张瑾, 齐铂金, 张少如. Z 源三电平中点钳位逆变器的空间矢量调制方法 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 108.
- [12] 张瑾, 齐铂金. Z 源三电平中点钳位逆变器中点电位平衡控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 7.
- [13] GAJANAYAKE C J, VILATGAMUWA D M, LOH P C, et al. Z-source-inverter-based flexible distributed generation system solution for grid power quality improvement [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(3): 695.
- [14] JASEM K, KEYHAN S, MOHSEN H, et al. Maximum constant boost approach for controlling quasi-Z-source-based interlinking converters in hybrid AC-DC microgrids [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(4): 938.
- [15] 王成山, 李琰, 彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 12.
- [16] 曾正, 李辉, 冉立. 交流微电网逆变器控制策略述评 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 142.
- [17] LI Y, JIANG S, RIVERA J G C, et al. Modeling and control of quasi-Z-source inverter for distributed generation applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1532.
- [18] 李小叶, 李永丽, 张玮亚, 等. 基于多功能并网逆变器的电能质量控制策略 [J]. 电网技术, 2015, 39(2): 556.
- [19] 贺昱耀, 冯伟, 宋石磊. Z 源级联三电平中点钳位逆变器 [J]. 电网技术, 2012, 36(4): 219.
- [20] 易桂平. 电网电压不平衡条件下微网恒功率控制策略研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 377.

收稿日期: 2018-09-18

(上接第 24 页)

- [15] 张少一, 刘华崧, 史贤俊, 等. 双 Y 移 30°PMSM 双电机串联系统的建模与仿真 [J]. 微特电机, 2015, 43(4): 14.
- [16] 刘华崧, 孙登亚, 刘陵顺, 等. 双 Y 移 30°PMSM 串联系统独立解耦控制 [J]. 船电技术, 2015, 35(11): 15.
- [17] 鲁晓彤. 非对称六相串联控制系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [18] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用 [J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19.
- [19] 马新宇, 庄海, 张颖杰, 等. 基于自抗扰控制技术的 PMSM-DTC 控制 [J]. 电气传动, 2017, 47(7): 17.
- [20] 祁世民. 基于自抗扰控制的永磁同步电机直接转矩控制 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [21] 刘陵顺, 韩浩鹏, 闫红广, 等. 基于自抗扰控制的对称六相 PMSM 与三相 PMSM 串联系统 [J]. 电力系统及其自动化, 2017, 39(1): 38.
- [22] 何京德, 刘陵顺, 赵国荣. 基于定子谐波电流的六相永磁同步电动机双电机串联系统的仿真 [J]. 电机与控制应用, 2011, 38(6): 11.
- [23] 邱立军, 付霖宇, 董琪, 等. 基于遗传算法优化参数 SVM 的备件需求预测研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(4): 88.

收稿日期: 2018-09-18