

# 基于FO-PI控制器的直流微网母线电压控制策略

谭超,乐周美,杨哲,龚晓辉

(三峡大学 电气与新能源学院,宜昌 湖北 443002)

**摘要:**为改善直流微电网母线电压稳定性及动态性能,提出一种基于自适应参数整定的FO-PI控制器控制直流母线电压方法。该方法在传统PI控制策略的基础上引入具有多参数可调的FO-PI控制器,并将带有自适应权重策略的粒子群算法运用于FO-PI控制器,从而解决控制器在具有多个参数时不可同时调节这些参数的问题。让直流微电网电压控制系统达到更优的可控性及灵活度。实验结果表明,所提出的控制策略在不增加系统成本的同时,能够使母线电压抗负载扰动能力更强,而且其整体性能优于传统控制方法。

**关键词:**直流微电网;电压控制;fractional-order PI(FO-PI)控制器;粒子群算法

**中图分类号:**TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19575

## Bus Voltage Control Strategy for DC Microgrid Based on FO-PI Controller

TAN Chao, YUE Zhoumei, YANG Zhe, GONG Xiaohui

(College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

**Abstract:** In order to improve the stability of the bus voltage and the dynamic performance of DC microgrid, a DC bus voltage control strategy based on the parameter self-tuning fractional-order PI(FO-PI)controller was proposed. The FO-PI controller with multi-parameter adjustment on the bases of traditional PI control strategy was introduced. Meanwhile, the particle swarm optimization algorithm with adaptive weighting strategy was applied to FO-PI controller to solve the problem that the multi-parameter of the controller could not be adjust at the same time. The above methods could make the voltage control system more controllable and flexible. The results show that the proposed control strategy can improve the anti-load-disturbance ability of the bus voltage without increasing the cost of the system, and its overall performance is better than the traditional control method.

**Key words:** DC- microgrid; voltage control; fractional-order PI(FO-PI) controller; particle swarm optimization (PSO) algorithm

近年来,分布式可再生能源发电受到了广泛的关注,微电网是分布式电源供电的有效途径以及发展趋势<sup>[1-4]</sup>。直流微电网中没有无功功率的波动,因此直流母线电压是衡量直流微电网安全与稳定运行的唯一指标。引起微电网内母线电压波动的原因主要有:直流母线上的负荷波动及投切;分布式电源的功率波动及投切;交直流微电网功率交换量的波动;交流电网或负载不平衡,谐波导致的波动;多变换器互联时系统特性变化导致的母线电压异常;电力电子开关装置产生的高频差模、共模噪声等<sup>[5]</sup>。目前针对直流微电网母线电压从产生机理、多源协调控制至扰动前馈控制算法、直流母线侧电能质量控制、基于

外加能量吸收装置等方面的研究已经较为成熟<sup>[6-8]</sup>。文献[9-11]提出了在直流微电网母线电压控制装置中引入负载电流前馈的方法。文献[12-14]中提出了基于BTB变换器及DC/DC, DC/AC双级系统的功率前馈控制方法。文献[15]将扰动观测器应用到交、直流微电网的直流母线电压控制方法中。然而上述研究多在传统PID双闭环控制的基础上进行改进,其效果依赖于比例增益和积分时间2个参数,且控制器对于系统参数变化较为敏感。

针对上述问题,提出了一种基于FO-PI控制器的直流微电网母线电压控制策略。该方法在传统PI控制策略的基础上引入分数阶,使其积分

项可调。但在增加控制参数的同时,参数整定难度也随之提高,因此文章提出将自适应惯性权重策略的粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法引入FO-PI控制器参数整定中来解决该问题。实验结果表明该控制方法相对于传统控制方法具有更好的鲁棒性来保证良好的电能质量,并且具有较短的动态响应时间。

## 1 微电网直流母线建模及分析

文章所提出的基于FO-PI控制器双闭环系统的控制框图如图1所示。图1中 $u(a,b,c)$ 为自然参考系 $(a,b,c)$ 中的电网电压矢量的分量; $i(a,b,c)$ 为自然参考系 $(a,b,c)$ 中电网电流矢量的分量; $R,L$ 分别为滤波电抗的电阻和电感,直流侧采用可变电阻 $R_L$ 替代; $i_0$ 为电源转换器的输出电流; $S(a,b,c)$ 为整流器切换状态; $u_{dc}$ 为直流母线电压; $u_{dc,ref}$ 为直流母线电压参考; $i_c$ 为流入电容器 $C$ 的电流; $i_d,i_q$ 分别为同步参考系 $(d,q)$ 中电网电流的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量(后文中 $i_{dq}$ 指 $i_d$ 和 $i_q$ 的合称); $i_{d-ref}$ 和 $i_{q-ref}$ 是同步参考系 $(d,q)$ 中电网电流参考值的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量,(后文中 $i_{dq-ref}$ 指 $i_{d-ref}$ 和 $i_{q-ref}$ 的合称),其中 $d$ 轴与电网电压矢量关联。

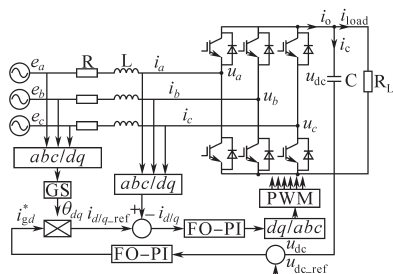


图1 基于FO-PI控制器双闭环系统的控制框图  
Fig.1 The block diagram of control strategy with double closed loop system based on FO-PI controller

图1所示的FO-PI控制器控制电压的控制系统为双闭环系统——电压外环和电流内环,两者均采用FO-PI控制器,其主要由3个功能组成:1)电网同步(GS)功能,产生与电网电压 $u(a,b,c)$ 同步的单位信号 $\theta_{dq}$ ;2)直流母线电压控制器(FO-PI控制器),控制直流母线电压 $u_{dc}$ ,使其值等于其参考电压 $u_{dc,ref}$ ;3)控制电网电流 $i_{dq}$ 的电流控制器(FO-PI控制器),使其以良好的精度跟踪其参考电流 $i_{dq,ref}$ ,该参考值 $i_{dq,ref}$ 通过将电压外环FO-PI控制器输出信号 $i_{gd}^*$ 乘以单位信号 $\theta_{dq}$ 来计算。

由图1可知,电流参考值 $i_{dq,ref}$ 是通过将电压

外环FO-PI控制器输出信号 $i_{gd}^*$ 乘以每单位信号 $\theta_{dq}$ 得出。由于开关频率高,在计算电压外环时,电流内环需加惯性环节 $1/(Ts+1)$ 。此时经过电流内环FO-PI控制,使得电流的跟随性能提高。由于 $dq$ 轴电流存在受控电压 $u_{dc}$ ,交叉耦合电压 $WLi$ 和电网电压 $u(a,b,c)$ 耦合的扰动,需采取解除 $d,q$ 轴之间的耦合来精确控制整流器的电流。通过解耦可得 $d$ 轴控制 $i_d,q$ 轴控制 $i_q$ 的传递函数为 $-u_{dc}/(Ls+R)$ ,从而得出电网电流 $i_{dq}$ 的值。考虑采样电路的延时性以及软件生成PWM波时的惯性特性<sup>[16]</sup>,得出图2所示的电流内环控制示意图。

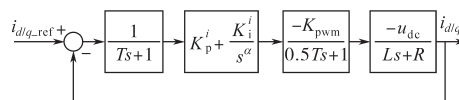


图2 电流环系统示意图

Fig.2 Schematic of current loop system

图2中, $K_{pwm}$ 为变换器的等效增益; $T$ 为开关周期; $K_p^i,K_i^i$ 分别为电流控制环的比例系数和积分系数; $\alpha$ 为积分阶次。由图2可得电流内环开环传递函数为

$$G_i(s) = \frac{K_{pwm} u_{dc} (K_p^i + K_i^i / s^\alpha)}{(1.5Ts + 1)(Ls + R)} \quad (1)$$

其闭环传递函数 $G_{ic}(s)$ 为

$$G_{ic}(s) = G_i(s) / [1 + G_i(s)] = \{ [K_{pwm} u_{dc} (K_p^i + K_i^i / s^\alpha)] / (1.5Ts + 1)(Ls + R) \} / \{ 1 + [K_{pwm} u_{dc} (K_p^i + K_i^i / s^\alpha)] / (1.5Ts + 1)(Ls + R) \} \quad (2)$$

若控制功率因数为1,则无功电流为0,从而电容电压为

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = i_d S - \frac{u_{dc}}{R_L} \quad (3)$$

式中: $S$ 为整流器切换状态。由直流侧参考电压 $u_{dc,ref}$ 和实际电压 $u_{dc}$ 的差值经过电压外环FO-PI控制得到电流参考值 $i_{dq,ref}$ 。参考值 $i_{dq,ref}$ 通过上文所述电流内环 $G_{ic}(s)$ 的控制,得出网电流 $i_{dq}$ 的值。由于电压外环的惯性较大,可以将其视为电压扰动,通过功率守恒可得变换器交流电流和直流电压之间的传递函数表达式:

$$u_{dc}(s)/i_d(s) = (SR_L)/(R_L Cs + 1) \quad (4)$$

经过解耦控制得到的电压外环控制结构示意图如图3所示。

图3中, $K_p^u,K_i^u$ 分别为电压控制环的比例系数和积分系数; $\lambda$ 为积分阶次。则电压外环开环

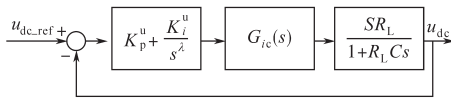


图3 电压环系统示意图

Fig.3 Schematic of voltage loop system

传递函数为

$$G_u(s) = \frac{G_{ic}(s)SR_L(K_p^u + K_i^u/s^\lambda)}{1 + R_L C s} \quad (5)$$

## 2 基于 PSO 算法的 FO-PI 控制器

### 2.1 FO-PI 控制器参数设计

分数阶比例积分项的控制器函数为

$$C(s) = K_p(1 + K_i/s^\alpha) \quad (6)$$

通过满足参数设计要求可得控制器参数<sup>[17]</sup>,但在模拟和实际测试中,为了接近  $s^\alpha$ , Oustaloup 使用近似算法在  $(w_b, w_h)$  频带内实现<sup>[18]</sup>,同时由于在高频区域这种近似效果并不好,文献<sup>[19]</sup>提出改进优化 Oustaloup 滤波算法,如下式所示:

$$s^\alpha = K \prod_{k=-N}^N (s + w'_k) / (s + w_k) \quad (7)$$

其中

$$K = w_h^\alpha$$

$$w'_k = w_b \left(\frac{w_h}{w_b}\right)^{\frac{k+N+(1-\alpha)/2}{2N+1}} \quad w_k = w_b \left(\frac{w_h}{w_b}\right)^{\frac{k+N+(1+\alpha)/2}{2N+1}}$$

式中:  $w_b, w_h$  分别为频带段  $(w_b, w_h)$  的最小值和最大值;  $k$  的取值范围为  $[-N, N]$ ;  $K$  为增益;  $w'_k, w_k$  分别为转化整数阶传递函数的零点和极点。

### 2.2 基于粒子群算法(PSO)的 FO-PI 参数寻优

PSO 算法采用基于群体随机优化技术的智能优化算法来模拟社会行为。PSO 算法的数学描述如下:设种群规模为  $A$ ,在迭代时刻  $t$  的第  $i$  粒子在  $N$  维空间中的位置向量表示为  $\mathbf{D}$ ;粒子的速度表示为  $\mathbf{V}$ ,则有下式:

$$\begin{cases} \mathbf{D}_i(n) = \{d_{i1}(n), d_{i2}(n), \dots, d_{in}(n)\} \\ \mathbf{V}_i(n) = \{v_{i1}(n), v_{i2}(n), \dots, v_{in}(n)\} \end{cases} \quad (8)$$

为提高算法的搜索效率,在上述基础上引入惯性权重  $w^{[20]}$ 。在迭代时刻  $t+1$  时第  $i$  粒子得到如下所示的位置和速度:

$$d_i(n+1) = d_i(n) + v_i(n+1) \quad (9)$$

$$v_i(n+1) = w_i(n)v_i(n) + r_1c_1[y_i(n) - d_i(n)] + r_2c_2[g(n) - d_i(n)] \quad (10)$$

式中:  $n$  为粒子  $i$  的迭代次数,  $w_i(n)$  为粒子  $i$  当前的惯性权重,代表粒子  $i$  寻优速度;  $c_1, c_2$  为粒子  $i$  的学习因子;  $r_1, r_2$  分别为  $(0, 1)$  间的随机数;  $y(n)$  为粒子  $i$  迭代  $n$  次经历最优位置;  $g(n)$  为种群中所有粒子迭代  $n$  次的历史最优位置。

采用 PSO 算法来控制 FO-PI 控制器参数,其中 FO-PI 控制器参数整定的基本思想为:将微电网电压控制器的参数相组合形成的粒子在搜索空间中飞行,通过控制算法中惯性权重和粒子最大飞行速度来调整粒子自身的飞行速度和种群的飞行经验,以保证粒子向全局最优逼近,直至找到最优目标,即获得 FO-PI 控制器的最优参数。采用 PSO 算法对 FO-PI 控制器的参数进行优化设计,控制流程图如图 4 所示。

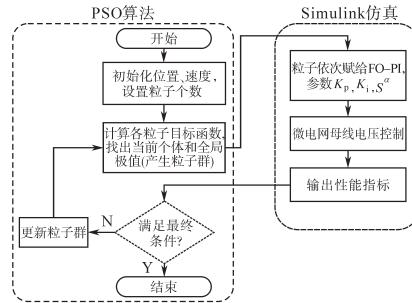


图4 基于 PSO 算法的 FO-PI 控制流程图

Fig.4 The flow chart of FO-PI control method based on PSO algorithm

图 4 中粒子群算法与 Simulink 模型仿真之间连接的桥梁是粒子(即控制器参数)和该粒子对应的适应值(即控制系统的性能指标)。基于带有自适应权重粒子群算法的 FO-PI 控制器控制电压的控制系统工作原理图如图 5 所示。

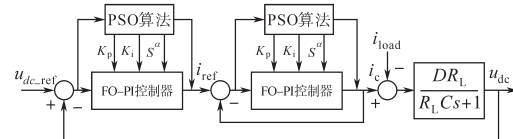


图5 基于 PSO 算法的 FO-PI 电压控制系统框图

Fig.5 The schematic of voltage control for FO-PI system based on PSO algorithm

### 2.3 波特图比较

图 6 为阶次变化时分数阶比例积分项的 Bode 图。由图 6 可看出,分数阶比例积分环节对应的幅频特性曲线的斜率比整数阶比例积分环节的

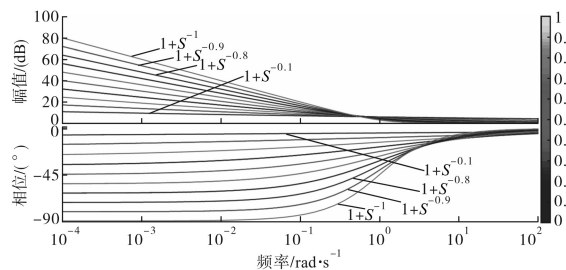


图6 阶次变化时分数阶比例积分项的 Bode 图  
Fig.6 Bode plot of fractional proportional integral term when the order changes

小,因此分数阶比例积分环节的系统的稳定性和快速性相比整数阶得到了较大提升。从相频特性 $j(\omega)$ 可知,分数阶比例积分环节比整数阶比例积分环节的稳定性裕度更大。因此,采用分数阶比例积分控制器可提高系统的快速性和稳定性。

图7为FO-PI控制器和传统PI控制器控制的直流母线电压波形对比图。从图7中可知,传统PI控制器得到的电压的峰值为610 V,而FO-PI控制器得到的峰值电压为580 V,且达到稳定的反应时间也更短。同时整数阶PI和FO-PI控制器下的电流THD如图8所示。图8中,电流THD从整数阶PI控制器的4.58%降到FO-PI控制器的2.52%。由此可知,FO-PI控制器在动态和静态方面的预期效果更好。

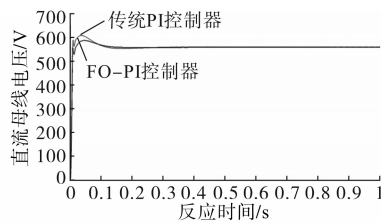


图7 PI和FO-PI控制器下直流母线电压波形

Fig. 7 The voltage waveforms of DC bus under the control of PI and FO-PI controllers

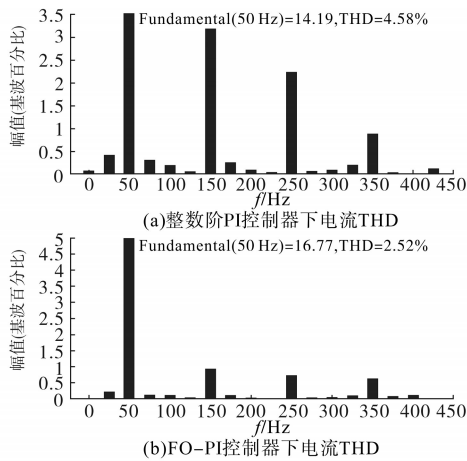


图8 整数阶PI和FO-PI控制器下电流THD

Fig. 8 The current THD of PI and FO-PI controllers

### 3 仿真与结果分析

#### 3.1 仿真模型与参数

在直流微电网中,可再生能源的不确定性及UPS系统的关键负载是导致母线电压波动的主要原因。为验证所提的控制系统的有效性和优越性,在Matlab/Simulink中搭建图1所示的控制策略模型进行仿真实验,并与传统的基于PI的直流母线电压控制器进行实验比较。PI控制器和

基于分数阶的直流母线电压控制器的参数为:滤波电感0.002 H,直流侧电容0.003 5 F,峰值相电压318 V,频率 $f=50$  Hz,直流母线电压560 V,断路器开关损耗0.01  $\Omega$ ,直流侧负载100  $\Omega$ ,缓冲电阻 $R_s=100$  k $\Omega$ 。

#### 3.2 仿真参数及实验

##### 3.2.1 实验1

在直流微电网母线电压控制模型中,直流母线电容为0.0035 F,在0~0.5 s时,微电网处于稳

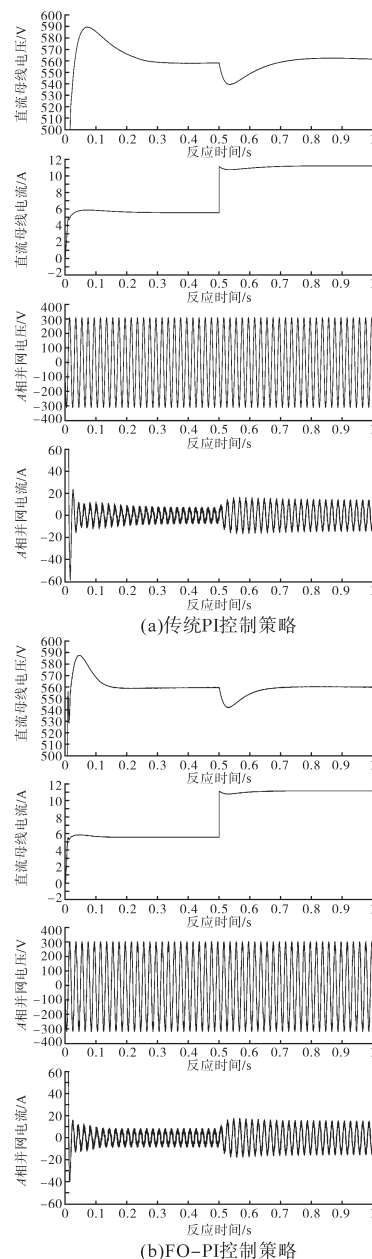


图9 当直流侧电容为0.003 5 F时传统控制策略与所提出的控制策略波形

Fig.9 The waveforms of traditional control strategy and the proposed control strategy when the capacitance in the DC side is 0.003 5 F

态运行模式下;0.5 s时刻,直流母线侧负载突增1倍以测试控制器的动态反应性能;实验时长为1 s,取0~1 s的波形图。

图9为当直流侧电容为0.003 5 F时所示的传统控制策略与所提出的控制策略波形。采用传统的控制方法时,实验结果如图9a所示。采用提出的基于FO-PI控制算法,实验结果如图9b所示。

由图9a)可知微电网直流母线电压经0.3 s达到稳定状态,此过程中的最高电压达到590 V。0.5 s时刻母线侧突增一倍负载,此时母线电压波动较大,峰值下冲电压为20 V。此后在经过0.5 s后系统重新达到稳定状态。同时,在微电网稳定运行时,直流母线电流为5.5 A;但微电负荷激增时,电流达到11 A,且恢复稳定时长为0.2 s。

由图9b)可知微电网直流母线电压经过0.15 s达到稳定状态,此过程中的最高电压达到585 V,与传统控制方法相比具有更小的超调量,系统动态响应更好。当母线侧在0.5 s突增一倍负荷时,此时的峰值下冲电压为10 V,小于图9a中20 V的下冲电压。经0.2 s后系统重新达到稳定状态,恢复稳定时长小于图9a中传统控制所需的0.5 s。对比实验表明,所提FO-PI控制策略相对于传统控制方法具有较小的系统误差,且较短的稳定恢复时间有利于系统的快速稳定。同时,所提出的FO-PI控制器相比传统的PI控制器动态响应控制策略具有超调量小,调节时间短,控制精确等优点。

### 3.2.2 实验2

与实验1相比,实验2的直流母线电容增加到0.07 F,以检查控制器在直流母线电容增加100%时的性能。控制参数与实验1相同。图10为所提出控制策略与传统PI控制策略的实验结果对比图。由图10可知,实验2的实验结果与实验1相比,得出了类似的结论,同时所提出的控制方法在恢复稳定时长和抗干扰能力方面均优于传统的PI控制器。传统PI控制方法的下冲电压为22 V,恢复时间长仍为0.5 s,而所提出控制器的下冲电压为16 V,恢复时长为0.2 s。

上述实验表明,所提出的基于FO-PI控制直流母线电压的控制策略具有良好的鲁棒性和动态响应能力。

## 4 结论

提出了一种基于FO-PI控制器的微电网直

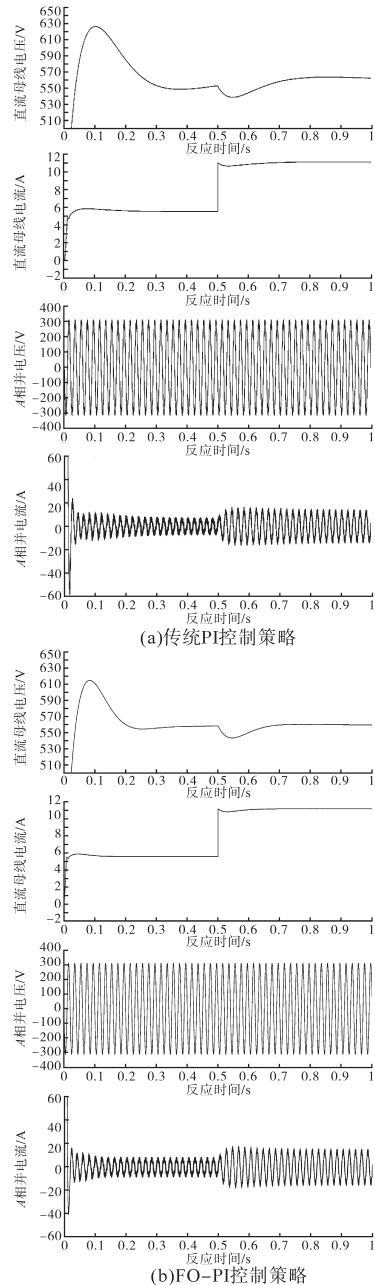


图10 当直流侧电容为0.007 F时传统控制策略与所提出的控制策略波形

Fig.10 waveforms of the traditional control strategy and the proposed control strategy when the capacitance in the DC side is 0.007F

流母线电压控制方法,对于静态区域中的传统控制器,该控制方法具有更好的鲁棒性来保证微电网直流母线良好的电能质量,同时在动态状态下具有较短的响应时间。为了验证所提方法的有效性,文章基于Matlab/Simulink平台进行实验。实验结果表明基于FO-PI控制器的电压控制方法具有良好的控制效果。该策略具有以下特点:采用简单的比例控制器确保直流母线电压的零

稳态跟踪误差;提供快速动态响应、应对直流母线电容变化时具有较高稳定性;实施难度小,具有广阔的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
- [2] 李霞林,郭力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):2-17.
- [3] 刘家赢,韩肖清,王磊,等. 直流微电网运行控制策略[J]. 电网技术,2014,38(9):2356-2362.
- [4] 马伟,王维庆,王海云. 微电网在孤岛模式运行时的下垂控制策略研究[J]. 电气传动,2017,47(1):18-22.
- [5] 张国荣,王新兵,乔龙洋. 直流微网中母线电压对直流负载影响[J]. 电力系统及其自动化,2013,35(2):65-67.
- [6] 王成山,李微,王议锋,等. 直流微电网母线电压波动分类及抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):84-98.
- [7] 陈景文,张东,党宏社. 基于下垂控制的直流微网多储能系统研究[J]. 电气传动,2018,48(1):42-46.
- [8] 刘健彝,陈乔夫,代少君,等. 串联混合型有源滤波器直流母线电压控制策略[J]. 电工技术学报,2012,27(9):54-61.
- [9] Wang J, Yan J D, Jiang L, *et al.* Delay-dependent Stability of Single-loop Controlled Grid-connected Inverters with LCL Filters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(1):743-757.
- [10] 李锐,邓磊,李小谦,等. 基于电容电压前馈的LCL逆变器并网控制[J]. 电气传动,2017,47(7):37-42.
- [11] Xiong F, Wu J, Liu Z, *et al.* Current Sensorless Control for Dual Active Bridge DC-DC Converter with Estimated Load-current Feedforward [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4):3552-3566.
- [12] Vijayakumari A, Devarajan A T, Devarajan N. Decoupled Control of Grid Connected Inverter with Dynamic Online Grid Impedance Measurements for Micro Grid Applications [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 68:1-14.
- [13] 王明渝,代同振,吴喜红,等. 双PWM变换器功率前馈控制策略仿真研究[J]. 系统仿真学报,2012,24(4):892-896.
- [14] 邱爱中,张海泉,崔晓,等. 一种双PWM变换器新改进型直接功率控制策略[J]. 国外电子测量技术,2016,35(4):59-63.
- [15] 吴忠强,谢建平. 带扰动观测器的网侧逆变器高阶终端滑模控制[J]. 电机与控制学报,2014,18(2):96-101.
- [16] 郭文娇. 交直流混合微电网三相AC/DC变换器控制策略研究[D]. 太原:太原理工大学,2016.
- [17] Chen Z, Yuan X, Ji B, *et al.* Design of a Fractional Order PID Controller for Hydraulic Turbine Regulating System Using Chaotic Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II [J]. Energy Conversion & Management, 2014, 84: 390-404.
- [18] 齐乃明,秦昌茂,王威. 分数阶系统的最优Oustaloup数字实现算法[J]. 控制与决策,2010,25(10):1598-1600.
- [19] Podlubny I. Fractional-order Systems and PI/Spl Lambda/D/Spl Mu/-controllers [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(1): 208-214.
- [20] Shi Y, Eberhart R C. A Modified Particle Swarm Optimizer [C]//IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Anchorage, USA, 1998:69-73.

收稿日期:2018-10-08

修改稿日期:2019-01-09