

自抗扰技术在微电网下垂控制策略中的应用

朱昊¹, 韦钢¹, 吴万禄¹, 周昌林²

(1. 上海市电站自动化技术重点实验室, 上海电力学院, 上海 200090;

2. 上海浦海求实电力新技术有限公司, 上海 200090)

摘要: 针对传统微电网下垂控制策略中控制参数整定复杂, 以及受电网电压、负荷波动影响较大等问题, 提出一种基于自抗扰技术的微电网下垂控制策略。该控制策略能够维持微电网在孤岛和并网模式下的稳定运行。自抗扰控制结构较强的抗干扰能力, 能够有效抑制各参量的波动, 对电网的不确定性干扰具有较好的抑制作用, 且设计方法简单易行。仿真结果表明, 当负荷发生变化时, 该控制策略能够有效地调节微电网内功率的平衡, 保证微电网电压和频率的恒定, 对微电网起到支撑作用。

关键词: 微电网; 下垂控制; 自抗扰控制; 双环控制; 状态观测器

The ADRC applied in droop control strategy in microgrid

ZHU Hao¹, WEI Gang¹, WU Wan-lu¹, ZHOU Chang-lin²

(1. Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai PUHAIQIUSHI Electric Power New Technology Limited Company, Shanghai 200090, China)

Abstract: For the traditional droop control strategy of the microgrid, it is difficult to adjust the control parameters of the strategy, and it is also affected by the grid voltage and load fluctuation greatly. To address the problem, this paper presents a droop control strategy of microgrid based on the technology of the ADRC, which can maintain the stable operation of microgrid under the islanded mode and the grid-connected mode. The structure of the ADRC has strong anti-interference ability, it can suppress the fluctuation of parameters and restrain the uncertain disturbance of the grid effectively, and the design method is also simple. The simulations reveal that the control strategy can maintain the balance of the power in microgrid effectively when the load is changing, keep the microgrid voltage and frequency constant, and play a supporting role in the microgrid.

Key words: microgrid; droop control; ADRC; double loop control; state observer

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)09-0061-07

0 引言

作为可再生能源与分布式发电的有效利用形式, 微电网技术正在成为当前的研究热点。微电网是由微电源、储能装置、电力电子器件、负荷和控制系统组成的整体, 即可并网运行又可孤岛运行^[1]。

由分布式能源和储能装置等组成的微电网既满足用户对高质量电能的需求, 又能在电网发生故障时孤岛运行。微电网系统的容量和惯性相对较小, 易受到来自分布式电源和负荷波动的影响, 因此如何对微电网中的各分布式电源进行有效的控制, 以保证微电网在孤岛和并网运行模式下能够满足负荷电能质量要求, 是微电网稳定运行的关键技术之一^[2-3]。

微电网中下垂控制策略, 通过调节控制器参数,

实现分布式发电(DG)有功和无功功率的合理输出, 满足微电网系统电压和频率的要求。基于传统下垂控制的微电网孤岛运行时, 易受负荷波动的影响而导致电压和频率的偏移, 对微电网的稳定运行产生影响。而并网运行时, 微电网输出功率易受大电网电压和频率的影响, 从而导致 DG 能源利用率下降^[4-6]。文献[7]设计基于下垂特性的控制器, 在孤岛和微网运行模式下进行控制, 并网时因电压和频率偏移造成 DG 不能工作在额定运行状态, 降低能源利用率。文献[8-9]在下垂控制中加入积分控制器, 实现逆变器的无差调频, 维持了微电网的电压和频率稳定运行, 但是控制器参数调节复杂。文献[10]考虑低压微电网线路阻抗特性, 对虚拟频率和电压进行解耦控制, 但是其控制算法复杂, 且其频率和电压评价标准与实际不符。文献[11]提出一种自适

应调节下垂系数控制器, 实现了微电网运行孤岛频率无静差, 电压幅值偏移量小以及并网恒功率输出等控制目标, 但并网模式控制特性较差, 且控制参数整定较复杂。

本文考虑传统下垂控制策略的局限性, 将自抗扰控制技术应用于微电网下垂控制策略中, 对传统下垂控制策略进行改进, 实现微电网孤岛和并网模式下功率的平衡调节, 维持了微电网系统电压和频率的恒定, 保证了微电网的稳定运行。

1 自抗扰控制技术

1.1 自抗扰控制器 (ADRC)

自抗扰控制器 (ADRC) 是一种非线性控制技术, 对于非线性复杂控制对象, 具有优良的控制效果及抗干扰能力^[12-13]。典型二阶自抗扰控制器结构如图 1 所示。

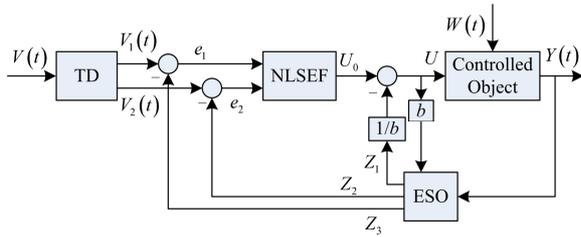


图 1 典型二阶自抗扰控制器
Fig. 1 Typical second order ADRC

(1) 跟踪微分器 (TD)。根据参考输入 $V(t)$ 以及受控对象的特性确定过渡过程, 得到理想的输入信号。TD 常用形式为

$$\begin{cases} V_1(t+h) = V_1(t) + hV_2(t) \\ V_2(t+h) = V_2(t) + hfhan(V_1(t) - V(t), V_2(t), r, h) \end{cases}$$

式中: $V(t)$ 表示输入信号; h 表示积分步长; $fhan(V_1, V_2, r, h)$ 表示非线性函数。

(2) 扩张状态观测器 (ESO)。ESO 是自抗扰控制器的核心, 它能估计各个状态量, 且能估计系统内外扰动的实时作用值, 并在反馈中对其进行补偿。ESO 一般形式为

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}fal(e, \alpha_1, \delta_1) + b \times u \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}fal(e, \alpha_2, \delta_1) \end{cases}$$

式中: $fal(e, \alpha, \delta)$ 表示非线性函数; u 表示控制量; b 表示常数; z_1 、 z_2 表示信号 y 的状态估计量; z_3 表示总干扰估计信号。

(3) 非线性状态误差反馈规律 (NLSEF)。

NLSEF 为 TD 的输出和 ESO 产生的状态变量估计之间的误差的非线性组合, NLSEF 一般形式为

$$u_0 = \beta_1 fal(e_1, \alpha_4, \delta_0) + \beta_2 fal(e_2, \alpha_5, \delta_0)$$

式中, $e_1 = V_1 - z_1$, $e_2 = V_2 - z_2$ 。由干扰估计信号 z_3 可得出控制量 $u = u_0 - z_3/b$ 。

自抗扰控制器的主要整定参数: TD 的 r 、 h ; ESO 的 $\{\alpha_1, \alpha_2, \beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}, \delta_1\}$; NLSEF 的 $\{\alpha_4, \alpha_5, \beta_1, \beta_2, \delta_0\}$ 等。

1.2 参数化自抗扰控制器 (LADRC)

针对自抗扰控制器参数整定的复杂性, 提出一种线性化的自抗扰控制器^[14]。设一类不确定对象为 $\dot{y} = g(y, \dot{y}, t) + W + du$, 其中, u 为输入, y 为输出, d 为常数, W 为扰动。

将外部扰动加入系统动态模型中, 可改为

$$\dot{y} = g(y, \dot{y}, w, t) + du$$

构造状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ef \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

$$\text{其中: } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ d \\ 0 \end{bmatrix}; E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$C = [1 \ 0 \ 0]; D = [0].$$

则系统的 LESO 可表示为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - L_1(z_1 - y) \\ \dot{z}_2 = z_3 - L_2(z_1 - y) + b_0u \\ \dot{z}_3 = -L_3(z_1 - y) \end{cases}$$

其中, $L = [L_1 \ L_2 \ L_3]^T$ 表示观测器的增益向量。

二阶线性自抗扰控制器结构如图 2 所示。

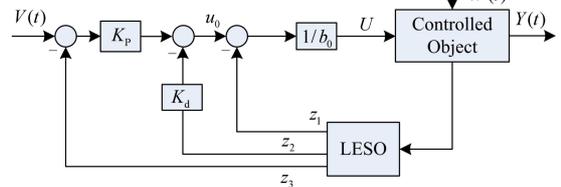


图 2 二阶线性自抗扰控制器
Fig. 2 Second order linear ADRC

图 2 中: $K_p = w_c^2$; $K_d = -2w_c$; w_0 是观测器的带宽, w_c 是控制器的带宽, $w_c = 2w_0$; u_0 是控制量。

二阶线性自抗扰控制器的设计需要调节 w_0 、 w_c 、 b_0 等三个参数, 大大简化了控制器的参数整定过程。本文采用二阶线性自抗扰技术设计微电网下

垂控制器。

2 基于自抗扰技术的微电网下垂控制

2.1 微电网结构

微电网中包含了微型燃气轮机、风力发电、光伏发电、燃料电池和储能装置等多种微电源形式。通过电力电子装置与馈线相连。微电网中还拥有潮流控制器和保护协调器,在能量管理系统的控制下,通过数据采集,实现系统调压、控制潮流、馈线保护等控制措施,向负荷供电^[15]。微电网模型如图 3 所示。

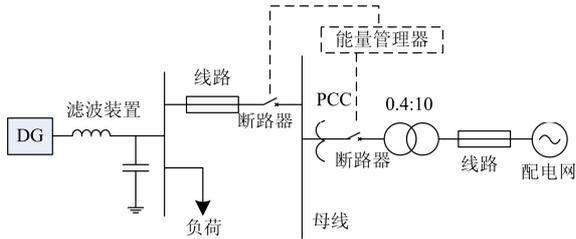


图 3 微电网模型

Fig. 3 Model of microgrid

本文主要侧重于微电网控制方法上的改进,为简化起见,故用理想直流电压源代替分布式电源和储能装置。

2.2 下垂控制结构

传统下垂控制策略是指模拟传统电网中发电机的运行特点,根据输出功率的变化控制电压源逆变器的输出电压和频率,使其自动跟踪预定的下垂特性^[16-17]。

根据低压微电网下输出阻抗呈感性的特性^[18-20],引入下垂控制策略,即

$$\begin{cases} U_i = U^* - k_{Q_i} Q_i \\ f_i = f^* - k_{P_i} (P_i - P_i^*) \end{cases} \quad (i=1,2,\dots)$$

其中,

$$\begin{cases} k_{Q_i} = \frac{U^* - U_{\min}}{Q_{\max i}} \\ k_{P_i} = \frac{f^* - f_{\max}}{P_{\max i} - P_i^*} \end{cases} \quad (i=1,2,\dots)$$

式中: U^* 和 f^* 分别为逆变器的电压幅值和频率参考值; P_i^* 和 P_i 分别是逆变器单元有功功率的基准值和实际输出值; Q_i 为逆变器输出的无功功率,一般情况下无功功率基准值为 0; k_{P_i} 和 k_{Q_i} 为下垂系数,其中 k_{Q_i} 为负值。

传统下垂控制结构由两部分组成,分别是功率控制环节和双环控制环节。

功率控制环节结构框图如图 4 所示。

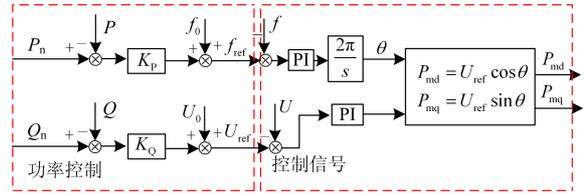


图 4 功率控制环节

Fig. 4 Power control section

如图 4,功率控制环节通过下垂特性得到微电网频率和电压幅值的参考信号 f_{ref} 、 U_{ref} ,采用 PI 控制器自动跟踪设定的下垂特性,继而达到控制输出有功 P 和无功功率 Q 的目的。

双环控制环节结构框图如图 5 所示。

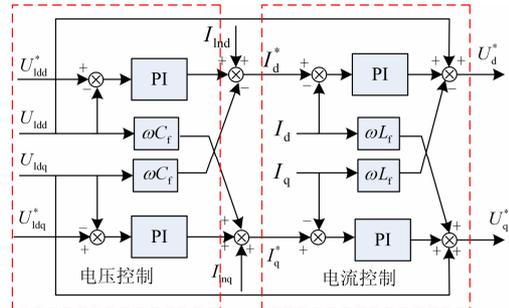


图 5 电压电流双环控制环节

Fig. 5 Voltage and current double-loop control section

如图 5, U_{ldd}^* 为双环控制参考电压幅值直轴分量; U_{ldd} 为双环控制电压幅值直轴分量; U_{ldq} 为双环控制电压幅值交轴分量; U_{ldq}^* 为双环控制参考电压幅值交轴分量; I_{ind} 为双环控制电流信号直轴分量; I_{inq} 为双环控制电流信号交轴分量; U_d^* 为 SVPWM 调制电压信号直轴分量; U_q^* 为 SVPWM 调制电压信号交轴分量。

电压电流双环控制结构的优点是响应速度快,对包含在环内的扰动及时调节,改善系统性能,提高系统的稳定性^[21-23]。

2.3 基于自抗扰技术的下垂控制

本文将自抗扰控制技术引入电压电流双环控制部分中,功率控制部分与传统下垂控制一致。基于自抗扰技术的微电网下垂控制结构如图 6 所示。

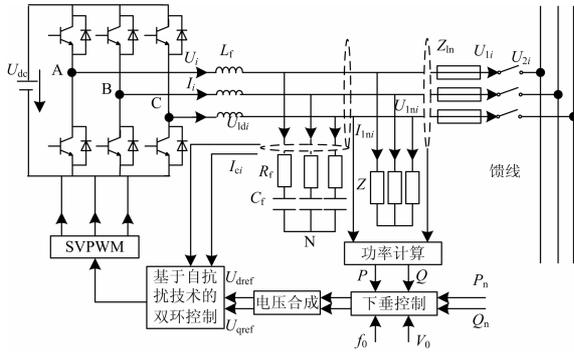


图 6 基于自抗扰技术的下垂控制结构

Fig. 6 Droop control structure based on the ADRC

图 6 中， U_{dc} 表示直流电压源，经空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 转换成三相交流电；采用 LC 滤波器滤除高次谐波， L_f 为滤波电感； C_f 为滤波电容； R_f 为滤波电阻； Z_{in} 为线路阻抗； Z 为负载； U_i 、 I_i 分别为逆变器输出电压和滤波电感上的电流； U_{ldr} 为滤波电容电压； I_{ci} 为滤波电容电流； I_{1ni} 为负载和网电流之和； U_{1ni} 为负载电压； U_{1r} 、 U_{2i} 分别为开关点两侧电压；下标 i 为 a、b、c 三相。经功率计算， P 、 Q 为逆变器实际输出功率； P_n 、 Q_n 为参考功率值，可由调度部门提供； U_{dref} 、 U_{qref} 分别为经下垂控制部分计算得到的电压参考信号^[24-25]。

双环控制环节加入自抗扰控制技术，其控制结构如图 7、图 8 所示。

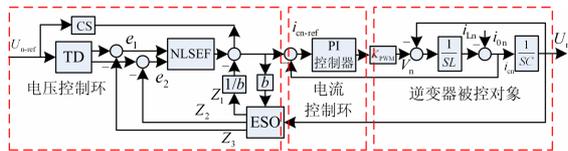


图 7 基于自抗扰的双环控制结构

Fig. 7 Double loop control structure based on the ADRC

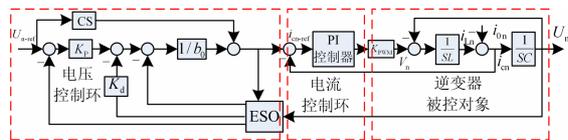


图 8 基于线性自抗扰的双环控制结构

Fig. 8 Double loop control structure based on the LADRC

图 3~图 8 中： U_{n-ref} 为电压参考信号； U_n 为输出电压信号； i_{cn-ref} 为电流参考信号； i_{Ln} 为电感电流信号； i_{cn} 为电容电流信号； i_{cn-ref} 与 i_{cn} 比较经电流 P 调节器后形成控制量； K_{PWM} 为 SPWM 逆变器传递函数； V_n 为逆变器输出电压信号； C 为电容； L 为电感； i_{on} 为电流扰动信号；CS 是电压前馈环节；

LESO 是扩张状态观测器。下垂控制方法采用自抗扰双环控制结构，外环输出电压采用自抗扰控制结构，根据电压差量迅速进行调节，补偿非线性扰动，稳定输出电压；内环电流环采用传统 PI 控制，以提升电流响应的快速性。当系统存在来自外部或内部扰动时，可能会引起并网冲击电流，自抗扰控制技术具有较强的抗干扰能力，可以对扰动信号进行消纳，以及较短的暂态过程，可为微电网系统的安全运行提供保障。同时加入电压前馈环，及时跟踪参考电压信号，增强控制系统的灵活性。

由于线性自抗扰下垂控制结构大大简化了控制参数的整定，故本文采用图 8 所示的线性控制结构进行仿真验证。

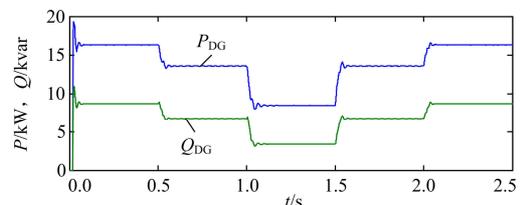
3 算例及仿真

基于 Matlab/Simulink 仿真平台，对所提出的微电网下垂控制策略进行动态仿真验证。

仿真参数如下：交流侧母线电压等级为 0.4 kV，通过升压变压器接入电压等级为 10 kV 的配电网；频率为 50 Hz；参考线电压取为 380 V；DG 理想直流电压源 $V_{dc} = 400$ V；LC 滤波器中电感 $L_f = 0.009$ H，电感 $C_f = 5 \times 10^{-5}$ F；电阻 $R_f = 0.01 \Omega$ ；线路 $z_{in} = (0.641 + j0.101) \Omega/\text{km}$ ^[15]；下垂控制策略中下垂系数分别取为 $m = 0.6 \times 10^{-5}$ ， $n = -3 \times 10^{-4}$ ；自抗扰控制参数分别为 $w_c = 150$ ， $w_0 = 40$ ， $b_0 = 40$ ；PI 控制参数为 $k_i = 5$ ， $k_p = 100$ 。

3.1 孤岛模式

微电网与大电网解列，处于孤岛模式，微电网中 DG 采用本文所提出的下垂控制策略，供给负荷。DG 额定输出功率为 $S_{DG} = (13 + j6)$ kVA，当 $t = 0$ s 时，负荷为 $S_{Load0} = (16 + j8)$ kVA；当 $t = 0.5$ s 时，负荷下降为 $S_{Load0.5} = (13 + j6)$ kVA；当 $t = 1$ s 时，负荷下降为 $S_{Load1} = (8 + j3)$ kVA；当 $t = 1.5$ s 时，负荷上升为 $S_{Load1.5} = (13 + j6)$ kVA；当 $t = 2$ s 时，负荷上升为 $S_{Load2} = (16 + j8)$ kVA；当 $t = 2.5$ s 时，仿真结束。仿真结果如图 9 所示。



(a) 孤岛运行状态 DG 输出有功和无功功率

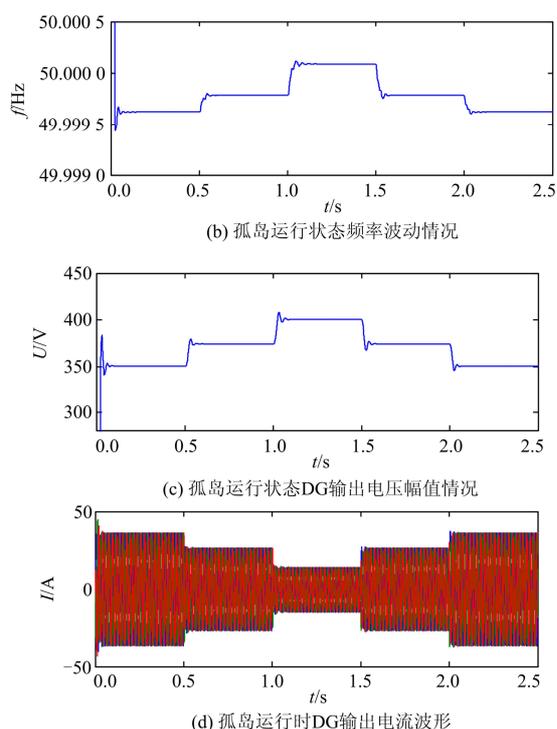


图9 孤岛模式下垂控制仿真结果

Fig. 9 Simulation results of droop control in islanded mode

由图 9, 微电网运行在孤岛模式, 在仿真时间内, 当负荷发生变化时, 系统能够维持自身的稳定运行, DG 输出有功和无功功率能够自动跟踪负荷变化, 暂态过程较短, 保证了微网内的功率平衡。频率波动在允许范围内, 电压幅值波动受负荷变化影响较大, 在额定运行点, DG 端口电压幅值与参考值一致。当 $t \in [0.5, 1.5]$ s 时, 负荷减小, 则微网频率和电压幅值上升; 当 $t \in [1.5, 2.5]$ s 时, 负荷增加, 则微网频率和电压幅值减小。DG 输出电流波形理想。

3.2 并网模式

微电网处于并网运行状态, DG 采用改进下垂控制策略。负荷变化与工况 1 相同, 仿真运行时间为 2.5 s。仿真结果如图 10 所示。图 10 中, P_{grid} 表示配电网所输出的有功功率; Q_{grid} 表示配电网所输出的无功功率, 负值表示 DG 向配电网输送无功功率; P_{DG} 表示 DG 输出的有功功率; Q_{DG} 表示 DG 所输出的无功功率。

由图 10, 微电网运行在并网模式时, 大电网具有维持电网频率和电压稳定的能力。当负荷发生变化时, 微网系统能够维持自身频率和电压的稳定, 频率和电压幅值经过短暂的调整, 均维持在恒定值。负荷一部分由大电网承担, 一部分由 DG 提供, 能

够保证电网功率的平衡。DG 并网电流波形理想。

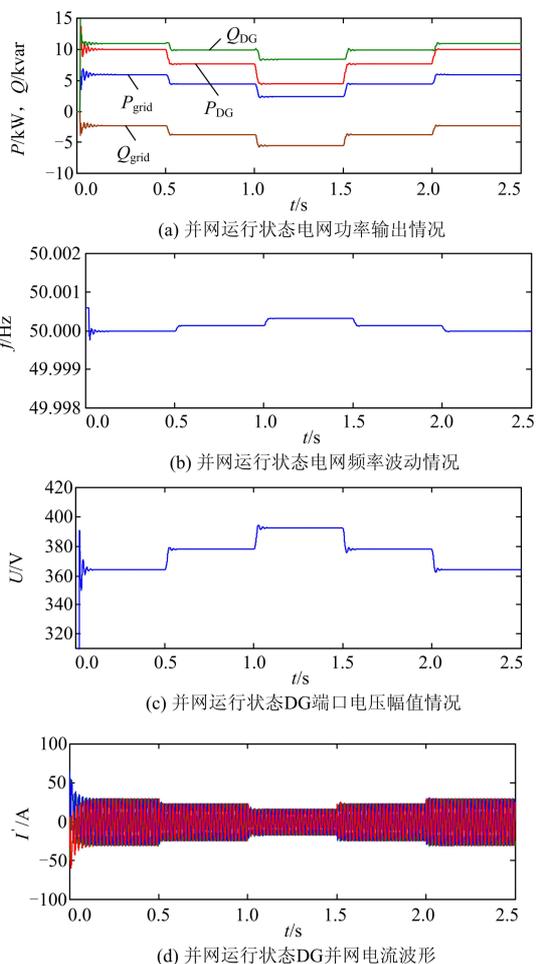


图10 并网模式下垂控制仿真结果

Fig. 10 Simulation results of droop control in grid-connected mode

4 结论

本文采用自抗扰控制技术对微电网下垂控制策略进行设计与改进, 主要结论如下:

(1) 将线性化自抗扰控制技术应用于微电网的控制策略中, 相对于传统 PI 控制, 参数整定过程简单, 控制效果理想。

(2) 该控制策略能够使微电网在孤岛和并网两种状态下稳定运行, 维持了微电网的功率平衡, 较好地满足了微电网系统对电能质量的要求。

(3) 下垂控制策略中的自抗扰结构具有较强的抗干扰能力, 有利于抑制微网并网过程中的冲击电流等干扰, 为微电网系统的稳定运行提供保障。

参考文献

[1] 苏玲, 张建华, 王利, 等. 微电网相关问题及技术研究

- [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 235-239.
SU Ling, ZHANG Jian-hua, WANG Li, et al. Study on some key problems and technique related on microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 235-239.
- [2] 范元亮, 苗逸群. 基于下垂控制结构微网小扰动稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 1-6.
FAN Yuan-liang, MIAO Yi-qun. Small signal stability analysis of microgrid droop controlled power allocation loop[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 1-6.
- [3] 艾欣, 许佳佳. 基于互动调度的微网与配电网协调运行模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 143-149.
AI Xin, XU Jia-jia. Study on the microgrid and distribution network cooperation model based on interactive scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 143-149.
- [4] 张纯江, 王晓寰, 薛海芬, 等. 微网中三相逆变器类功率下垂控制和并联系统小信号建模与分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 32-39.
ZHANG Chun-jiang, WANG Xiao-huan, XUE Hai-fen, et al. A quasi-power droop control of three-phase inverters and small signal modeling and analysis of parallel system in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 32-39.
- [5] 孙孝峰, 吕庆秋. 低压微电网逆变器频率电压协调控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 77-84.
SUN Xiao-feng, Lü Qing-qiu. Improved PV control of grid-connected inverter in low voltage microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 77-84.
- [6] 杨琦, 马世英, 李胜, 等. 微型电网运行及控制设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 267-273.
YANG Qi, MA Shi-ying, LI Sheng, et al. Design of microgrid operation model and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 267-273.
- [7] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.
WANG Cheng-shan, XIAO Zhao-xia, WANG Shou-xiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [8] 时珊珊, 鲁宗相, 闵勇, 等. 无差调频过程中微电源功率分配策略设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 23-27.
SHI Shan-shan, LU Zong-xiang, MIN Yong, et al. Design of a power distribution strategy for microsources during zero-error frequency regulation process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 23-27.
- [9] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 164-168.
YANG Xiang-zhen, SU Jian-hui, DING Ming, et al. Research on frequency control for microgrid in islanded operation[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 164-168.
- [10] LI Yan, LI Yun-wei. Virtual frequency-voltage frame control of inverter based low voltage microgrid[C] // Proceedings of the IEEE Electrical Power & Energy, Conference Montreal, Canada, October 22-23, 2009: 1-6.
- [11] 郑永伟, 陈民铀, 李闯, 等. 自适应调节下垂系数的微电网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 1-6.
ZHENG Yong-wei, CHEN Min-you, LI Chuang, et al. Control strategy for microgrid based on adaptive adjusting the drooping coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 1-6.
- [12] 梁芳. 基于自抗扰控制技术的并网光伏系统研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2012.
LIANG Fang. Research on grid-connected photovoltaic system based on ADRC[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2012.
- [13] 于阳. 基于自抗扰控制策略的 SVC 在风电系统中的应用研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2012.
YU Yang. The research on active disturbance rejection control strategy for SVC in wind farm[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2012.
- [14] 陈星. 自抗扰控制器参数整定方法及其在热动过程中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2008.
CHEN Xing. Active disturbance rejection controller tuning and its applications to thermal processes[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [15] 李钢, 赵静, 姚振纪. 智能微电网的控制策略研究综述[J]. 电工电气, 2012(1): 1-4.
LI Gang, ZHAO Jing, YAO Zhen-ji. Control strategy study roundup of intelligent microgrid[J]. Electrotechnics Electric, 2012(1): 1-4.
- [16] 舒海莲. 微电网运行特性及其控制研究[D]. 上海: 上海电力学院, 2011.

- SHU Hai-lian. Research of microgrid for its operation characteristic and control[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2011.
- [17] 郑竞宏, 王燕廷, 李兴旺, 等. 微电网平滑切换控制方法及策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 17-24.
- ZHENG Jing-hong, WANG Yan-ting, LI Xing-wang, et al. Control methods and strategies of microgrid smooth switchover[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 17-24.
- [18] PECAS LOPES J A, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.
- [19] 周贤正, 荣飞, 吕志鹏, 等. 低压微电网采用坐标旋转的虚拟功率 V/f 下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 47-51, 63.
- ZHOU Xian-zheng, RONG Fei, Lü Zhi-peng, et al. A coordinate rotational transformation based virtual power V/f droop control method for low voltage microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 47-51, 63.
- [20] 陶晓峰. 分布式互补能源微网系统的控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- TAO Xiao-feng. Research on control strategy of microgrid with distributed complementary energy[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [21] 毕大强, 牟晓春, 任先文, 等. 含多微源的微电网控制策略设计[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 687-693.
- BI Da-qiang, MOU Xiao-chun, REN Xian-wen, et al. Design on control strategies of microgrid with multiple micro sources[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 687-693.
- [22] GUERRERO J M, VICUNA L G, et al. Wireless control strategy for parallel operation of distributed generation inverter[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1461-1470.
- [23] ARBOLEYA P. An improved control scheme based in droop characteristic for microgrid converter[J]. Electric Power Systems, 2010.
- [24] 姚玮, 陈敏, 牟善科, 等. 基于改进下垂法的微电网逆变器并联控制技术[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 77-80, 94.
- YAO Wei, CHEN Min, MOU Shan-ke, et al. Paralleling control technique of microgrid inverters based on improved droop method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 77-80, 94.
- [25] DIAZ G, GONZALEZ-MORAN C, GOMEZ-ALEIXANDRE J, et al. Complex-valued state matrices for simple representation of large autonomous microgrids supplied by PQ and Vf generation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(4): 1720-1730.

收稿日期: 2013-06-15; 修回日期: 2013-09-19

作者简介:

朱昊(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网运行与控制, 分布式发电技术等; E-mail: zhuhao19881225@126.com

韦钢(1958-), 男, 通讯作者, 硕士, 教授, 主要研究方向为电力系统运行分析, 电力系统规划, 电力谐波及补偿技术等; E-mail: wg5815@sohu.com

吴万禄(1987-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统规划, 新能源发电技术方面的研究工作。