



隆重¹ 戴宇辰² 杨成顺² 杨帆² 许德智³ 黄宵宁²

孤岛分布式能源系统的反步控制策略研究

摘要

针对含分布式能源(DER)的微电网在孤岛运行模式下自身调节能力有限的问题,基于反步控制方法设计了一种DER系统孤岛运行电压控制策略,解决了DER系统在孤岛运行模式下的电压控制问题.首先,给出了孤岛运行模式下DER系统模型及输出电压数学模型;其次,利用反步控制方法设计了控制器,同时利用李雅普诺夫稳定性理论进行了稳定性分析;最后,利用此控制器在平衡负载及不平衡负载的情况下对输出电压进行控制,并通过仿真验证了反步控制器的有效性.

关键词

孤岛;分布式能源;反步控制;电压跟踪

中图分类号 TP29

文献标志码 A

收稿日期 2017-12-31

资助项目 国家自然科学基金(61503156);江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金(XTCX201714)

作者简介

隆重,男,硕士,高级工程师,一级建造师,主要研究方向为电网建设施工,运维检修技术及管理.

许德智(通信作者),男,博士,副教授,研究方向为数据驱动控制,故障诊断与容错控制和新能源控制技术.lutxdz@126.com

0 引言

随着传统能源的日益衰竭以及人们的环保意识逐渐增强,使得分布式能源(Distributed Energy Resource, DER)发电技术得到了飞速发展,并且广泛运用到配电网中^[1-2].世界上存在着许多偏远地区,如山区、岛屿等,拥有大量的太阳能,因此利用光伏面板、储能装置及电力电子装置便可组成一个DER系统给微电网供电^[3-4].由于地域原因,存在着部分DER系统无法与大电网互联的情况,即DER系统存在孤岛运行模式.由于孤岛DER系统容量小,又缺乏与大电网功率的互相传输,当负载发生变化时,如果缺乏相应的控制,DER系统很难维持输出电压与频率的稳定,导致输出电压质量低,会对系统及用电设备造成损害.因此在孤岛DER系统中,如何在负载不断变化的情况下保持系统输出电压稳定成为了重要问题之一.

对于DER系统的孤岛运行问题,相关学者已经进行了部分研究.文献[5-6]利用恒压恒频控制策略,通过监测电压与频率的波动而相应地进行有功及无功补偿,实现了孤岛模式下DER系统电压控制.文献[7]利用 V/f 和Droop控制方法对DER输出电压进行控制,但是仿真过程中将电源等效为理想电源,没有模拟真实运行情况,输出电压过于理想,缺乏谐波分析.文献[8]则对传统无功下垂控制器进行了改进,并通过仿真与普通下垂控制器效果进行比对,提高了控制效果,但并未用不同类型的负载对模型进行仿真.在电力系统实际运行过程中,系统的负载并不是固定不变的,而是根据时间的变化不停地变动的,若控制器参数设计不当,可能会在系统负载动态变化时表现出较差的控制性能.文献[9]提出利用分数阶滑模控制方法对孤岛DER系统进行控制,并对平衡负载、不平衡负载及非线性负载情况进行仿真,使输出电压很好地跟踪了参考电压.

近年来,非线性控制技术得到了快速发展,反步控制作为非线性控制方法的一种,由美国教授Kokotovic等于1991年首次提出^[10].反步控制是基于非线性系统降阶的控制方法,即将高阶的非线性系统分解成不超过系统最高阶数的若干子系统,从底层分别对每个子系统定义误差量、虚拟控制量及设计李雅普诺夫函数,一直后退到整个系统,并利用李雅普诺夫函数稳定性条件设计系统控制器,从而保证系统的稳定性^[11].文献[12]使用反步设计方法,设计了发电机与励磁协调控制器,使系统的电压达到稳定,实现系统的渐进稳定性.文献

1 贵州送变电工程公司,贵阳,550000

2 南京工程学院 电力工程学院,南京,211167

3 江南大学 物联网工程学院,无锡,214122

[13]则将反步与滑模控制方法相结合,在系统参数及外界扰动不确定时控制了输出电压的稳定及谐波含量,具有较强的鲁棒性.文献[14]提出一种基于反步控制 Boost 变换器,使用反步法使输出电流跟踪内环电流,通过仿真验证了在负载变化的不确定情况下系统具有精确的跟踪性能.文献[15]将指令滤波与反步控制相结合,提高了背靠背直流输电系统的动态特性,保持了直流电压的平衡,实现了有功功率与无功功率的协调控制,并通过仿真验证了控制方法的可行性.综上所述,反步控制能有效地控制被控对象,使系统具有较好的鲁棒性.然而基于反步控制方法对孤岛 DER 系统的控制此前并没有相关文献与研究涉及.对文中给出的孤岛 DER 系统^[9]数学建模后可知,此系统为一个二阶非线性系统.本文利用反步控制方法,对系统模型进行降阶后设计了反步控制器,并将控制器运用到系统中,实现了系统输出电压对给定参考电压的跟踪,并利用 Matlab/Simulink 仿真验证在不同负载情况下的跟踪效果.

1 孤岛 DER 系统模型

图 1 给出了孤岛 DER 系统模型.从图 1 中可以看出,系统主要包括了 DER 电源、电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC)、三相 LC 滤波器、控制单元、脉冲宽度调制信号发生器 (Pulse Width Modulation, PWM)、变压器及负载.系统的直流侧由分布式电源与并联电流支撑电容器 C_{dc} 组成,电容 C_{dc} 的主要功能是吸收 VSC 向直流侧索取的脉动电流,维持输出直流电压的稳定.系统中逆变器 VSC 拓扑结构为三相全桥逆变器,由 3 组 6 只绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 及

续流二极管组成,作用是将直流电压逆变成三相交流电压.系统交流侧中变量 v_{abc} 、 i_{abc} 、 v_{sabc} 及 i_{sabc} 分别表示 VSC 交流端电压、VSC 交流端电流、DER 系统末端电压及 DER 系统末端电流.三相 LC 滤波器由电感 L 与电容 C_f 组成,电阻 R 表示滤波电感的损耗及 VSC 中通态电阻.孤岛 DER 系统并不与大电网并联运行,系统输出电压经变压器调压后直接给负载供电.

在系统的控制单元中,通过三相交流电压、电流测量装置,将 i_{abc} 、 v_{sabc} 及 i_{sabc} 转换成电压电流信号,并经 dq 变换将三相电压电流信号转换到 dq 旋转坐标系后,送入控制器.同样被送入控制器的还有角频率 ω 和参考电压 v_{sdref} 、 v_{sqref} .参考电压是规则电压,目的是通过系统末端电压 v_{sd} 及 v_{sq} 对参考电压波形的跟踪,实现不依赖系统输出电流而保持输出电压的稳定.在与大电网互联的微网系统中,常使用锁相环 (Phase Locked Loop, PLL) 得到 dq 变换中的旋转角 ρ .但在孤岛运行模式中,系统与大电网并不互联,系统自身在没有控制的情况下无法提供稳定的角频率 ω ,因此需人为设定系统所期望的稳定角频率 ω 作为控制器角频率,并将 ω 经压控振荡器 (Voltage Controlled Oscillator, VCO) 转换成旋转角 ρ 后提供给 dq 变换器使用.

控制器将上述输入信号进行计算处理,输出 dq 旋转坐标系下的 m_{dq} 控制信号,将此信号重新变换到三相坐标系下则得到 PWM 三相调制波.将调制波与三角载波相比并取反叠加后得到 6 路脉冲控制 VSC^[16],使系统输出电压根据负载变化依然保持稳定.

接下来对系统进行数学建模.依据基尔霍夫电压及电流定律,图 1 所示的孤岛 DER 系统电压电流

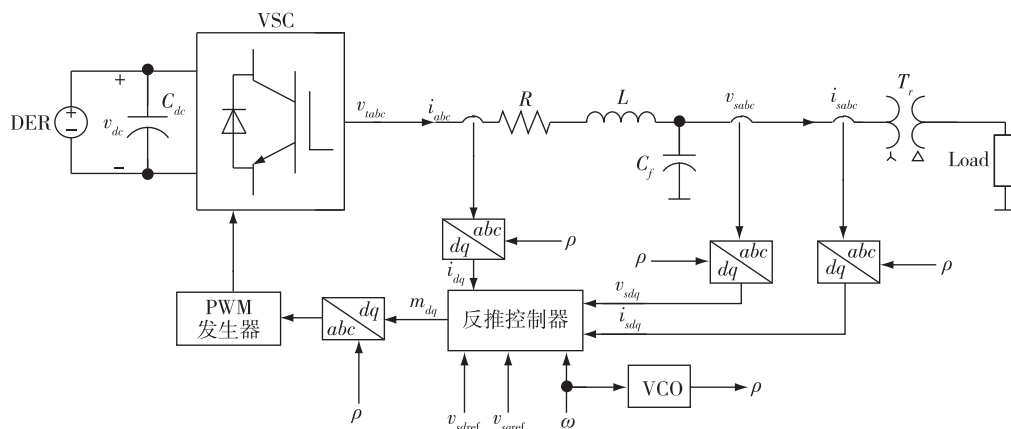


图 1 孤岛 DER 系统模型

Fig. 1 Schematic diagram of islanded DER system

关系可被表示为如下数学形式:

$$C_f \frac{d\vec{v}_s}{dt} = \vec{i} - \vec{i}_s, \quad (1)$$

$$L \frac{d\vec{i}}{dt} = \vec{v}_i - \vec{v}_s - R\vec{i}, \quad (2)$$

式中 \vec{i} 、 \vec{i}_s 、 \vec{v}_i 与 \vec{v}_s 分别为 i_{abc} 、 i_{sabc} 、 v_{iabc} 与 v_{sabc} 的空间向量表示. 消去式(1)与式(2)中的向量 \vec{i} 可以得到:

$$\frac{d^2\vec{v}_s}{dt^2} = -\frac{R}{L} \frac{d\vec{v}_s}{dt} - \frac{\vec{v}_s}{LC_f} - \frac{1}{C_f} \frac{d\vec{i}_s}{dt} - \frac{R\vec{i}_s}{LC_f} + \frac{\vec{v}_i}{LC_f}. \quad (3)$$

对于三相电压型桥式逆变电路来说,交流侧输出电压的幅值等于直流侧电压的一半,三相波形与调制波波形保持一致,由此可建立 VSC 交流端电压 \vec{v}_i 与 PWM 调制波 \vec{m} 之间的关系,表示为

$$\vec{v}_i = \frac{v_{dc}}{2} \vec{m}. \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),可将式(3)重新写成如下形式:

$$\frac{d^2\vec{v}_s}{dt^2} = -\frac{R}{L} \frac{d\vec{v}_s}{dt} - \frac{\vec{v}_s}{LC_f} - \frac{1}{C_f} \frac{d\vec{i}_s}{dt} - \frac{R\vec{i}_s}{LC_f} + \frac{v_{dc}\vec{m}}{2LC_f}. \quad (5)$$

将式(5)中三相电压电流转换到 dq 旋转坐标系下,可将式(5)重新表示为

$$\begin{aligned} \frac{d^2[(v_{sd} + jv_{sq})e^{j\rho}]}{dt^2} = & -\frac{R}{L} \frac{d[(v_{sd} + jv_{sq})e^{j\rho}]}{dt} - \\ & \frac{(v_{sd} + jv_{sq})e^{j\rho}}{LC_f} - \frac{1}{C_f} \frac{d[(i_{sd} + ji_{sq})e^{j\rho}]}{dt} - \\ & \frac{R(i_{sd} + ji_{sq})e^{j\rho}}{LC_f} + \frac{v_{dc}(m_d + jm_q)e^{j\rho}}{2LC_f}. \end{aligned} \quad (6)$$

将等式(6)中等号左侧 d 轴与 q 轴电压分别列写,可分解成:

$$\begin{aligned} \frac{d^2v_{sd}}{dt^2} = & 2\omega \frac{dv_{sq}}{dt} - \frac{R}{L} \frac{dv_{sd}}{dt} + \left(\omega^2 - \frac{1}{LC_f}\right)v_{sd} + \\ & \frac{R\omega}{L}v_{sq} - \frac{1}{C_f} \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{\omega}{C_f}i_{sq} - \frac{R}{LC_f}i_{sd} + \frac{v_{dc}}{2LC_f}m_d, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2v_{sq}}{dt^2} = & -2\omega \frac{dv_{sd}}{dt} - \frac{R}{L} \frac{dv_{sq}}{dt} + \left(\omega^2 - \frac{1}{LC_f}\right)v_{sq} - \\ & \frac{R\omega}{L}v_{sd} - \frac{1}{C_f} \frac{di_{sq}}{dt} - \frac{\omega}{C_f}i_{sd} - \frac{R}{LC_f}i_{sq} + \frac{v_{dc}}{2LC_f}m_q, \end{aligned} \quad (8)$$

其中 ρ 为两相旋转坐标系 d 轴与两相静止坐标系 α 轴之间的夹角,由 VCO 提供.式中所有变量所使用的角频率 ω 都为固定的 100π (rad/s).

2 反步控制器设计

本节采用反步控制方法对孤岛 DER 系统输出电压进行控制,选择 m_d 与 m_q 作为控制量.本文将使用反步控制方法分别对 d 轴与 q 轴控制器进行设计.首先对 d 轴进行控制器设计.

1) 步骤 1.为使系统降阶,进行如下定义:

$$\dot{v}_{sd} = y_d. \quad (9)$$

将式(9)代入式(7),则式(7)可以被写成:

$$\dot{y}_d = f_d(v_{sd}, v_{sq}, i_{sd}, i_{sq}) + g m_d, \quad (10)$$

其中, $f_d(v_{sd}, v_{sq}, i_{sd}, i_{sq})$ 与 g 分别被定义为

$$\begin{aligned} f_d(v_{sd}, v_{sq}, i_{sd}, i_{sq}) = & 2\omega \frac{dv_{sq}}{dt} - \frac{R}{L} \frac{dv_{sd}}{dt} + \left(\omega^2 - \frac{1}{LC_f}\right)v_{sd} + \\ & \frac{R\omega}{L}v_{sq} - \frac{1}{C_f} \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{\omega}{C_f}i_{sq} - \frac{R}{LC_f}i_{sd}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$g = \frac{v_{dc}}{2LC_f}. \quad (12)$$

定义 d 轴与参考电压的误差量:

$$e_1 = v_{sd} - v_{sdref}. \quad (13)$$

为方便计算,先对式(13)求导得到

$$\dot{e}_1 = \dot{v}_{sd} - \dot{v}_{sdref}. \quad (14)$$

定义虚拟控制量与虚拟控制量误差:

$$\alpha_1 = -c_1 e_1 + \dot{v}_{sdref}, \quad (15)$$

$$e_2 = \dot{v}_{sd} - \alpha_1, \quad (16)$$

其中 c_1 为大于零的常数.定义 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2}e_1^2. \quad (17)$$

对式(17)求导,并将式(14)、(15)、(16)代入后得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & e_1 \dot{e}_1 = e_1(\dot{v}_{sd} - \dot{v}_{sdref}) = e_1(e_2 + \alpha_1 - \dot{v}_{sdref}) = \\ & e_1(e_2 - c_1 e_1 + \dot{v}_{sdref} - \dot{v}_{sdref}) = \\ & -c_1 e_1^2 + e_1 e_2. \end{aligned} \quad (18)$$

由式(18)可知,若要保证在任何时刻都有 $\dot{V}_1 \leq 0$,则要有 $z_2 = 0$.为了系统稳定需要下一步设计.

2) 步骤 2.再次定义 Lyapunov 函数:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_2^2. \quad (19)$$

对式(19)求导,并将式(18)代入,得

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 = -c_1 e_1^2 + e_1 e_2 + e_2 \dot{e}_2, \quad (20)$$

其中 \dot{e}_2 可由式(16)求导得到

$$\dot{e}_2 = \ddot{v}_{sd} - \dot{\alpha}_1 = f_d(v_{sd}, v_{sq}, i_{sd}, i_{sq}) + g m_d + c_1 e_1 - \ddot{v}_{sdref}. \quad (21)$$

将式(21)代入式(20)可得

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 = -c_1 e_1^2 + e_1 e_2 +$$

$$e_2[f_d(v_{sd}, v_{sq}, i_{sd}, i_{sq}) + gm_d + c_1 e_1 - \ddot{v}_{sdref}]. \quad (22)$$

根据 Lyapunov 稳定性定理,若要系统稳定,则必须满足 $\dot{V}_2 \leq 0$,为此设计控制器 m_d 为

$$m_d = \frac{1}{g}[-f_d(v_{sd}, v_{sq}, i_{sd}, i_{sq}) - c_1 e_1 - c_2 e_2 - e_1 + \ddot{v}_{sdref}], \quad (23)$$

其中 c_2 为大于零的常数.

同理,可用相同方法对 q 轴控制器进行设计.

1) 步骤 1.使系统降阶,定义

$$v_{sq} = y_q. \quad (24)$$

将式(24)代入式(8),则式(8)可写成

$$\dot{y}_q = f_q(v_{sd}, v_{sq}, i_{sd}, i_{sq}) + gm_q, \quad (25)$$

其中 g 与式(12)定义相同, $f_q(v_{sd}, v_{sq}, i_{sd}, i_{sq})$ 定义为

$$f_q(v_{sd}, v_{sq}, i_{sd}, i_{sq}) = -2\omega \frac{dv_{sd}}{dt} - \frac{R}{L} \frac{dv_{sq}}{dt} + \left(\omega^2 - \frac{1}{LC_f}\right)v_{sq} -$$

$$\frac{R\omega}{L}v_{sd} - \frac{1}{C_f} \frac{di_{sq}}{dt} - \frac{\omega}{C_f}i_{sd} - \frac{R}{LC_f}i_{sq}. \quad (26)$$

定义 q 轴与参考电压误差:

$$e_3 = v_{sq} - v_{sqref}. \quad (27)$$

对式(27)求导,得到

$$\dot{e}_3 = \dot{v}_{sq} - \dot{v}_{sqref}. \quad (28)$$

定义虚拟控制量与虚拟控制量误差:

$$\alpha_2 = -c_3 e_3 + \dot{v}_{sqref}, \quad (29)$$

$$e_4 = \dot{v}_{sq} - \alpha_2, \quad (30)$$

其中 c_3 为大于零的常数.定义 Lyapunov 函数:

$$V_3 = \frac{1}{2}e_3^2. \quad (31)$$

对式(31)求导,并将式(28)、(29)、(30)代入得

$$\dot{V}_3 = e_3 \dot{e}_3 = e_3(\dot{v}_{sq} - \dot{v}_{sqref}) = e_3(e_4 + \alpha_2 - \dot{v}_{sqref}) = e_3(e_4 - c_3 e_3 + \dot{v}_{sqref} - \dot{v}_{sqref}) = -c_3 e_3^2 + e_3 e_4. \quad (32)$$

同样,上述结果不能保证 $\dot{V}_3 \leq 0$,为了实现系统稳定需要进行下一步设计.

2) 步骤 2.定义 Lyapunov 函数:

$$V_4 = V_3 + \frac{1}{2}e_4^2. \quad (33)$$

对式(33)求导后将式(32)代入,得

$$\dot{V}_4 = \dot{V}_3 + e_4 \dot{e}_4 = -c_3 e_3^2 + e_3 e_4 + e_4 \dot{e}_4, \quad (34)$$

其中 \dot{e}_4 可由式(30)求导得到

$$\dot{e}_4 = \ddot{v}_{sq} - \dot{\alpha}_2 = f_q(v_{sd}, v_{sq}, i_{sd}, i_{sq}) + gm_q + c_3 e_3 - \ddot{v}_{sqref}. \quad (35)$$

将式(35)代入式(34)可得

$$\dot{V}_4 = \dot{V}_3 + e_4 \dot{e}_4 = -c_3 e_3^2 + e_3 e_4 + e_4[f_q(v_{sd}, v_{sq}, i_{sd}, i_{sq}) + gm_q + c_3 e_3 - \ddot{v}_{sqref}]. \quad (36)$$

同样,根据 Lyapunov 稳定性定理,设计控制器 m_q 为

$$m_q = \frac{1}{g}[-f_q(v_{sd}, v_{sq}, i_{sd}, i_{sq}) - c_3 e_3 - c_4 e_4 - e_3 + \ddot{v}_{sqref}], \quad (37)$$

其中 c_4 为大于零的常数.

图 2a 与图 2b 分别给出了上文中设计的 d 轴与 q 轴反步控制器控制流程,其中 D^n 表示积分及微分阶数(n 为正表示微分, n 为负表示积分).从图 2 中可以看出,通过控制器对误差信号进行处理,产生了 PWM 调制信号 m_d, m_q . 将此信号坐标变换回到三相坐标系中,并通过此信号与载波产生 6 路脉冲控制 VSC 产生需要的输出电压波形.

3 稳定性分析

根据 Lyapunov 稳定性理论,对整个系统进行稳定性分析.上一章中提出的反步控制器的 d 轴与 q 轴 Lyapunov 函数分别为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_2^2 = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2, \quad (38)$$

$$V_4 = V_3 + \frac{1}{2}e_4^2 = \frac{1}{2}e_3^2 + \frac{1}{2}e_4^2. \quad (39)$$

观察式(38)可知,对任意误差量 e_1 及 e_2 , 都有 $V_2 \geq 0$,当且仅当 $e_1 = e_2 = 0$ 时等号成立,所以 V_2 为正定函数.同理,可以验证 q 轴 Lyapunov 函数 V_4 也为正定函数.

Lyapunov 函数 V_2 与 V_4 的导数 \dot{V}_2 与 \dot{V}_4 分别由式(22)与式(36)给出,现将控制器 m_d (23)、 m_q (37)分别代入式(22)与式(36)化简得到:

$$\dot{V}_2 = -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2, \quad (40)$$

$$\dot{V}_4 = -c_3 e_3^2 - c_4 e_4^2, \quad (41)$$

其中 c_1, c_2, c_3, c_4 均为大于零的常数.

观察式(40)可知,由于 c_1 与 c_2 大于零,所以对于任意误差量 e_1 及 e_2 , 都有 $\dot{V}_2 \leq 0$,当且仅当 $e_1 = e_2 = 0$ 时等号成立,所以 \dot{V}_2 为负定函数.同理可得 \dot{V}_4 也为负定函数.

对于 d 轴控制器来说,有 $V_2 \geq 0, \dot{V}_2 \leq 0$,根据 Lyapunov 稳定性定理系统在原点处是渐进稳定的,同理, q 轴控制器在原点处也符合渐进稳定条件.综上所述,全系统符合稳定性条件.

4 仿真研究

为验证所设计反步控制器的有效性,本文按照

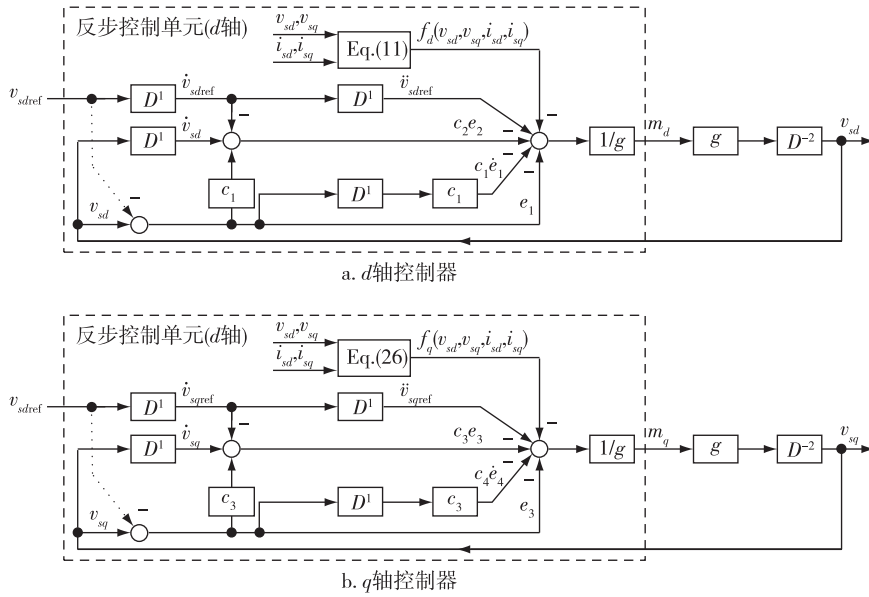


图 2 反步控制器控制流程

Fig. 2 Schematic diagram of control flow chart under the backstepping controller

图 1 所示孤岛 DER 模型,使用 Matlab/Simulink 搭建了电气模型,在三相平衡与三相不平衡负载情况下进行了仿真.表 1 给出了孤岛 DER 系统元件参数,表 2 给出了不同负载的参数.此外,为了使所提出的反步控制器具有良好的控制效果,控制器中参数分别设置为 $c_1 = 600, c_2 = 8\,000, c_3 = 1\,000, c_4 = 6\,000$.

表 1 孤岛 DER 系统元件参数

Table 1 Islanded DER system circuit parameters

参数	数值	单位
L	300	μH
C_f	500	μF
R	3	$\text{m}\Omega$
v_{dc}	1 800	V
ω	100π	rad/s
T_r	4. 16/0. 69	kV/kV

注: T_r 为变压器变比,是电压有效值的比值.

表 2 不同类型负载参数

Table 2 Load parameters of DER system

负载类型	连接方式及参数	变压器变比/(kV/kV)
三相平衡负载	三相星型 RL 串联负载, $R = 170\text{ m}\Omega,$ $L = 218\text{ }\mu\text{H}$	4. 16/0. 69
三相不平衡负载	A 相为 RL 串联负载, 另两相开路, $R = 17\text{ m}\Omega,$ $L = 21. 8\text{ }\mu\text{H}$	4. 16/0. 208

中可以看出,在仿真持续的 1 s 过程中,通过反步控制器的控制,系统的输出电压对参考电压表现出了很好的跟踪效果,并在 0.5 s 负载从三相平衡负载切换到三相不平衡负载时实现了电压平稳过渡,维持了电压的稳定,除系统运行中正常微小的电压抖动外,未出现较大的电压浮动,系统表现出对负载变化很强的应对性和适应性.当 $t = 0.75\text{ s}$,模拟了系统对阶跃信号的响应,参考电压从 449 V 突变至 510 V.从图 3 中可以看出,系统的输出电压对参考电压的突变也有很好的响应.当系统接收到参考电压突变信号时,系统输出电压立即做出响应,随参考电压的升高而升高,并经历短暂的波动后继续对参考电压进行跟踪,保持了输出电压稳定.

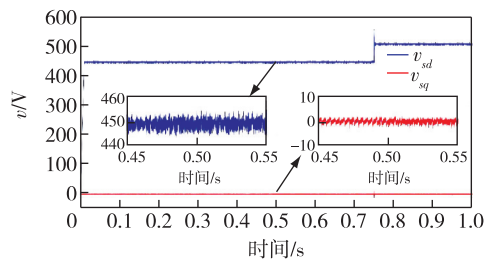


图 3 电压跟踪效果

Fig. 3 Output voltage tracking effect

图 3 显示了整个仿真过程中系统输出电压 v_{sd} 、 v_{sq} 分别对给定参考电压 $v_{sdreref}$ 、 $v_{sqreref}$ 的跟踪效果.从图

图 4a 显示了从 dq 轴变换回到 abc 轴后系统的三相输出电压,图 4b 给出了 0.8~0.9 s 间,系统稳定运行时,输出电压的放大波形.从图中可以看出,

系统输出电压规则稳定,说明反步控制器起到了很好的控制效果.

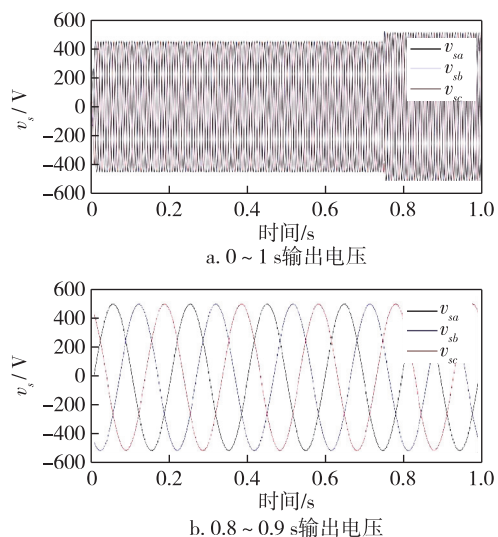


图4 系统三相输出电压

Fig. 4 Three phase output voltage of islanded DER system

图5显示了对图4b输出电压进行谐波分析后的结果.从图5中可以看出,在系统稳定运行时,7次谐波最高约为0.12%,其余次谐波均保持在0.04%以内,总谐波失真率为0.44%,均符合电能质量要求.

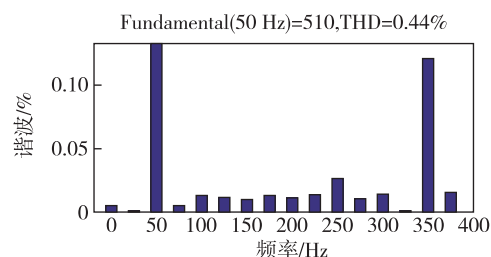


图5 输出电压谐波分析

Fig. 5 Harmonic analysis of output voltage

5 结论

本文提出了采用反步控制策略,对孤岛DER系统输出电压进行控制的方法,通过Matlab/Simulink仿真验证了此控制方法的控制性能.仿真表明,系统的输出电压对参考电压实现了很好的跟踪效果,并在不同负载切换产生的外界扰动及参考电压突变情况下能够快速响应,恢复跟踪.最后对输出电压进行了谐波分析,验证了系统输出电压的电能质量满足所期望的性能指标.同时,本文中所设计的控制器与得出的结论为此课题后续的研究工作奠定了基础.

参考文献

References

- [1] 李潇雨,黄珂.分布式能源发展政策研究文献综述[J].华北电力大学学报(社会科学版),2015(1):20-25
LI Xiaoyu, HUANG Ke. The literature review for the study on development policy of distributed energy [J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2015(1) : 20-25
- [2] 丁磊.多微网配电系统的分层孤岛运行及保护控制[D].济南:山东大学电气工程学院,2007
DING Lei. Hierarchical islanding, protection and control of distribution network with multi-microgrids [D]. Jinan: School of Electrical Engineering, Shandong University, 2007
- [3] 任洪波,邱留良,吴琼,等.分布式能源系统优化与设计综述[J].中国电力,2017,50(7):49-55
REN Hongbo, QIU Liuliang, WU Qiong, et al. A review of optimization planning and designing of distributed energy systems [J]. Electric Power, 2017, 50(7) : 49-55
- [4] Lew D, Asano M, Boemer J, et al. The power of small: The effects of distributed energy resources on system reliability [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(6) : 50-60
- [5] 李旭光.微电网的建模、仿真及运行特性分析[D].天津:天津大学电气自动化与信息工程学院,2009
LI Xuguang. Modeling and simulation of micro-grid and operating characteristic analysis [D]. Tianjin: School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, 2009
- [6] 张炜.微电网控制运行及对电压稳定性的影响研究[D].太原:太原理工大学电气与动力工程学院,2013
ZHANG Wei. Research on operation and the influence of voltage stability in microgrid [D]. Taiyuan: College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, 2013
- [7] 李坤.微电网综合控制策略研究[D].成都:西南交通大学电气工程学院,2013
LI Kun. Research on microgrid comprehensive control strategy [D]. Chengdu: School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 2013
- [8] 陈丽娟.微电网中分布式电源的协调控制与优化研究[D].上海:上海电机学院,2016
CHEN Lijuan. Research on coordination control and optimization of distributed generators in micro-grid [D]. Shanghai: Shanghai Dianji University, 2016
- [9] Delghavi M B, Shoja-Majidabad S, Yazdani A. Fractional-order sliding-mode control of islanded distributed energy resource systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4) : 1482-1491
- [10] 苏善伟,朱波,向锦武,等.非线性非最小相位系统的控制研究综述[J].自动化学报,2015,41(1):9-21
SU Shanwei, ZHU Bo, XIANG Jinwu, et al. A survey on the control of nonlinear non-minimum phase systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(1) : 9-21
- [11] 杨俊华,吴捷,胡跃明.反步方法原理及在非线性和鲁棒

- 控制中的应用[J]. 控制与决策, 2002(增刊1): 641-647
- YANG Junhua, WU Jie, HU Yueming. Backstepping method and its applications to nonlinear robust control [J]. Control and Decision, 2002(sup 1): 641-647
- [12] 邹彪,王杰. 静止同步补偿装置与发电机励磁的无源协调反步控制设计[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 74-79
- ZOU Biao, WANG Jie. Coordinated control for STATCOM and generator excitation based on passivity and backstepping technique [J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 74-79
- [13] 侯波,穆安乐,董锋斌,等. 单相电压型全桥逆变器的反步滑模控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 93-99
- HOU Bo, MU Anle, DONG Fengbin, et al. Backstepping sliding mode control strategy of single-phase voltage source full-bridge inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 93-99
- [14] Langarica-Cordoba D, Leyva-Ramos J, Diaz-Saldierna L H, et al. Nonlinear current-mode control for boost power converters: A dynamic backstepping approach [J]. IET Control Theory & Applications, 2017, 11(14): 2261-2269
- [15] Huang J, Xu D Z, Yan W X, et al. Nonlinear control of back-to-back VSC-HVDC system via command-filter backstepping [J]. Journal of Control Science and Engineering, 2017
- [16] 李世平,李擎,李华德. 大功率双三电平逆变器的优化SPWM调制策略[J]. 电气应用, 2005, 24(5): 34-37
- LI Shiping, LI Qing, LI Huade. Optimization SPWM strategy for a high-power double three-level inverter [J]. Electrotechnical Application, 2005, 24(5): 34-37

Backstepping control strategy for islanded distributed energy resource system

LONG Zhong¹ DAI Yuchen² YANG Chengshun² YANG Fan² XU Dezhi³ HUANG Xiaoning²

1 Guizhou Electric Power Transmission and Transformation Engineering Company, Guiyang 550000

2 School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167

3 School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122

Abstract According to the problem of limited self-adjustment ability of microgrid with distributed energy resource (DER) under islanding operation mode, a control strategy based on backstepping control method is designed, which solves the voltage control problem of DER system in islanding operation mode. Firstly, the system model and the mathematical model of output voltage of islanded DER system are given. Secondly, the controllers are designed by using backstepping control method step by step, and the stability analysis is proved by using the Lyapunov stability theory. Finally, the designed controllers are used to control the output voltage under balanced load and unbalanced load, and the effectiveness of the backstepping controllers is verified by simulation.

Key words island; distributed energy resource (DER); backstepping control; voltage tracking