

基于三相四桥臂的双模式变流器控制策略研究

陶 艳

(湖南铁道职业技术学院, 湖南 株洲 412001)

摘要: 针对微网系统在离网模式下,给不平衡负荷供电之一问题,文中采用三相四桥臂作为双模式变流器拓扑,并设计了并网与离网双模式工作及并离网模式切换的控制策略,可解决离网模式下不平衡负载引起的电压不平衡问题。根据不同模式下三相四桥臂变流器的数学模型,采用电网电压定向的电感电流闭环控制策略实现并网模式运行,采用双同步旋转坐标系下的正负序电压控制以及零序电压的比例谐振控制策略实现离网模式运行。同时,采用一种控制模式的平滑切换方法来实现并网与离网两种模式的独立运行。最后,通过仿真对采用的双模式变流器控制策略进行了验证。仿真结果表明,采用的双模式控制策略在并网模式下可以准确跟踪功率指令,在离网模式下可有效抑制不平衡负载的扰动,实现输出电压平衡。在并离网切换过程中,该控制方法能够减小负载电压变化与输出电流的冲击,实现负载的不间断供电。

关键词: 微网; 三相四桥臂; 双模式变流器; 不平衡负载; 模式切换

Control Strategy for Grid Tied and Islanding Mode of Four Leg Converters

TAO Yan

(Hunan Railway Professional Technology College, Hunan Zhuzhou 412001, China)

Abstract: For the problem caused by the unbalanced load in microgrid working in islanding mode, a three phase four-leg topology is adopted as a double mode converter to operate in both of grid-tied and islanding mode and the voltage unbalance issue is mitigated in islanding mode. In grid-tied mode, the inductor current is controlled based on grid voltage orientation and the unsymmetrical output voltage is controlled in positive and negative synchronous frames in islanding mode based on the mathematical model. Especially, the zero sequence voltage is suppressed by resonant regulator. The two modes can work independently through smooth transition. Finally, the double mode strategy is verified by simulation. The simulation results show that the control method can track the power command accurately in grid-tied mode, and suppress the disturbances and output symmetrical voltage under unbalanced loads. In modes transition, the method can reduce the transient voltage and inrush current, and achieve the reliable and uninterrupted power supply for loads.

Key words: microgrid; three phase four-leg; double mode converter; unbalanced loads; mode transition

0 引言

近年来,随着新能源发电系统的不断增多,传统的配电网面临越来越多的问题,微网系统在新能源发电接入方面逐渐显现出优势。一般来说,微网中的变流器应当具备并网和离网两种运行模式,并能在两种模式间灵活切换,因此对双模式变流器的研究逐渐受到重视^[1-3]。

文[4]对单相双模式变流器的控制进行了研究,

采用 CAN 通信实现多机输出同步与并联均流,但没有对三相系统进行进一步的拓展。文[5]采用间接电流控制技术,在并网模式下通过控制电容电压间接控制变流器输出电流,使变流器能够在双模式下运行而不切换控制结构,但是该方法对 LCL 滤波器中网侧电感量的需求较大。文[6-12]对基于 LCL 滤波器的传统三相变流器双模式运行进行了研究,提出了相应的控制与模式切换策略,但离网模式的控制没有考虑负载不平衡等非理想工况。通常的低压配

电系统多采用三相四线制,同时为单相或三相负载供电。三相三桥臂变流器在离网模式运行时,负载不平衡会引起系统的电压不平衡,供电质量下降。因此,在三桥臂变流器一般使用 Δ/Y_n 变压器,为不平衡负载提供零序通路。但是增加的工频变压器带来了系统体积与成本的增加,并且无法对零序电压进行直接控制。

文中基于三相四桥臂变流器在并网与离网模式下的数学模型,研究了适合于三相四桥臂变流器的双模式控制策略。在并网模式下采用基于同步旋转坐标系的电感电流闭环矢量控制。离网模式下,采用双同步旋转坐标系下的正负序电压控制,并针对三相四线制中存在的基波零序电压,采用比例谐振控制器对其进行抑制。最后,通过仿真验证了所采用的三相四桥臂变流器的双模式控制策略的有效性以及模式之间的平滑切换。

1 系统结构

文中所述的三相四桥臂双模式变流器系统拓扑见图 1。图 1 中: e_a, e_b, e_c 为电网电压; Z_{load} 为负载; g 点为中性点; u_a, u_b, u_c, u_n 为变流器输出电压; T_1-T_8 为变流器的开关管; L 为三相滤波电感; L_n 是中线电感; i_a, i_b, i_c, i_n 为变流器的三相电感电流及中线电流; i_{ga}, i_{gb}, i_{gc} 为变流器输出电流; i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 为负载电流; U_{dc} 为变流器直流电压; i_{dc} 为直流侧电流。整个微网系统通过 PCC 点的并网开关 K 与主电网相连。

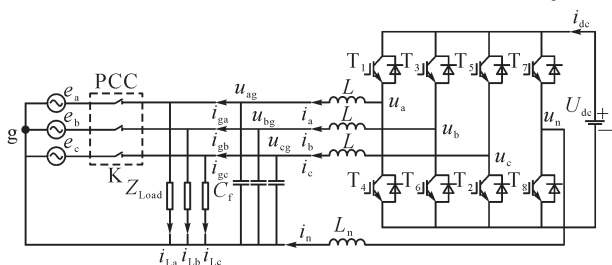


图 1 双模式变流器系统拓扑

Fig. 1 Topology of a double mode converter system

系统运行时存在两种工况,并网运行与离网运行。当电网正常时,PCC 点的开关 K 闭合,变流器运行在并网模式,其输出功率可以调节,负载由变流器和电网共同供电;当电网因调度或故障时断开开关 K,变流器运行在离网模式,维持系统的电压与频率,实现系统的不间断供电。

2 系统控制策略

2.1 并网模式控制策略

图 1 中,并网模式下 PCC 点的并网开关 K 闭

合,节点电压由大电网支撑,双模式变流器以控制注入系统的电流为目标。由于变流器通过 LC 滤波器与电网相连接,所以电容电压与电网电压相同,即 $e_x = u_x (x=a, b, c)$ 。但是滤波电容的存在,会使得注入网侧的电流还有一定的无功分量,导致采用传统电感电流反馈的控制时,并网电流与电网电压存在一定的相角差。文[13]分析了 LC 滤波器并网时的电流相位问题,认为当采用大电感、小电容设计的 LC 并网滤波电路,可以减小电容电流对并网电流相位的影响。因此,可以忽略滤波电容的影响,等效为通过输出电感并网的三相变流器进行控制^[13],此时 $i_x = i_{gx} (x=a, b, c)$ 。为了便于控制器设计,通常利用坐标变换,将静止坐标系下的模型变换为同步旋转坐标下的数学模型,从而将时变量转化为直流量,以实现解耦控制。根据坐标变换,可以得到并网模式下三相四桥臂变流器在同步旋转坐标系中的等效模型

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -e_d + L_n \frac{di_d}{dt} + u_d \\ L \frac{di_q}{dt} = -e_q + L_n \frac{di_q}{dt} + u_q \\ (L + 3L_n) \frac{di_0}{dt} = -e_0 + u_0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,零序电流分量 $i_0 = (i_a + i_b + i_c)/3 = -i_n/3$ 。

由式(1)可见,与常用的三相三桥臂变流器在同步坐标系下的模型相似, d 轴与 q 轴之间存在耦合项 $\omega L i_d$ 、 $\omega L i_q$,不同之处在于增加了零轴分量。由于零轴与 d 轴、 q 轴之间不存在任何耦合关系,所以可以单独控制。为了实现对系统有功功率和无功功率的独立控制,采用基于 PI 控制器的电感电流闭环的前馈解耦控制策略,PI 控制器参数的设计采用了按照劳思-赫尔维茨稳定判据以及控制器参数对系统稳定性、动态性能等影响分析,利用小惯性合并和零极点抵消逐步降阶,然后进行极点配置的设计方法^[14]。控制框图见图 2。由于中间直流电压由后级的蓄电池或 DC/DC 电路来控制,所以 d 轴和 q 轴电流指令直接由系统微网控制器给定的有功功率和无功功率指令计算得到,如式(2)所示;在电网平衡的情况下,通常零轴的电流指令设置为零。计算得到的 d 轴、 q 轴和零轴的变流器参考电压值送入三维空间矢量调制模块^[15],经调制得到桥臂的开关驱动信号。

$$\begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{e_d^2 + e_q^2} \begin{bmatrix} e_d & -e_q \\ e_d & e_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 离网模式控制策略

当电网出现故障或根据调度需要,PCC 节点的并网开关 K 断开,整个系统处于离网状态,此时的

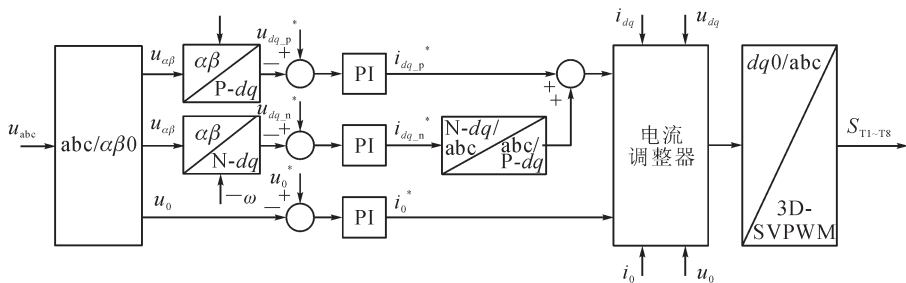


图 3 离网模式下的控制框图

Fig. 3 Control diagram of islanding mode

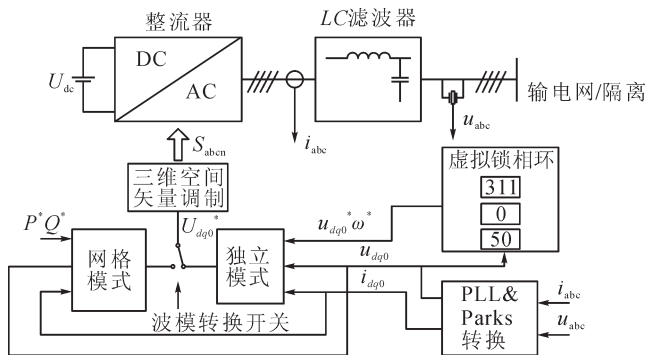


图 4 双模式变流器总体控制框图

Fig. 4 Schematic of overall control strategy of a double mode converter

需要检测电网电压,由 PLL(锁相环)计算得到电网频率与坐标变换的角度;在离网模式中,变流器需要虚拟 PLL 提供频率与坐标变换的角度,可以由外部设定给定频率。虚拟 PLL 结构如图 4 中所示,控制器直接给定一个常规电网的频率及 d 轴与 q 轴电压值,及在离网工况下,变流器按照预先设定的频率,及 d 轴与 q 轴电压固定的进行输出。

双模式变流器需要根据计划或非计划离网分别在并网模式与离网模式之间切换,切换过程中,如何尽可能的维持负载电压稳定并抑制电流的冲击最为关键。

并网模式向离网模式转换:在并网模式运行时,调节虚拟 PLL 的频率与相位,使之与并网 PLL 输出保持一致。微网控制器根据计划孤岛或被动检测非计划孤岛,向双模式变流器发出从并网模式到离网模式的切换信号,此时并网 PLL 转换为虚拟 PLL,并网模式电流环的输出转换为离网模式双闭环的输出进行模式切换,离网模式下的电压给定值与并网时的电网电压幅值一致。因此,切换时变流器输出电压沿用了并网时 PCC 点的电压幅值与相位,以避免电流冲击。若负载容量大于变流器容量时,还需要微网控制器根据需要切出一部分负载。

离网模式向并网模式转换:在离网模式运行

时,当电网恢复后,微网控制器检测 PCC 点两侧的负载电压与电网电压,并网 PLL 重新运行。此时,逐步调整虚拟 PLL 的输出频率与相位与并网 PLL 一致,电压给定值调整为电网电压幅值,即调节变流器输出电压的幅值、频率与相位,使之与电网电压相同。当幅值、相位差满足重并网条件后,合上 PCC 处的并网开关,然后发出切换命令,离网模式双闭环输出切换为并网模式下的电流环输出。当变流器输出电压与电网电压同相位、同幅值时,变流器输出电流接近于零,切换后并网模式的给定电流逐渐从零增加至微网控制器给定的期望值^[6,20],进一步减小对负载的影响。

3 仿真验证

3.1 双模式控制策略仿真

利用 MATLAB/Simulink 进行了仿真验证,仿真参数见表 1。

表 1 变流器仿真参数

Table 1 Parameters of simulation

参数	数值	参数	数值
变流器容量/(kVA)	15	滤波电感/mH	4
滤波电容/ μ F	30	中线电感/mH	2
开关频率/kHz	10	输出相电压(50 Hz)/V	220

1)并网模式。并网模式下,变流器依据能量管理系统的指令,以逆变状态向电网注入功率或以整流状态为蓄电池充电,仿真结果见图 5。图 5(a)中,变流器处于逆变工况,0.25 s 时输出功率指令增加;图 5(b)中,变流器在 0.23 s 从整流工况转变为逆变工况。从图 5 可以看出,输出电流响应迅速。

2)离网模式。0.3 s 之前,三相负载相同,均为 3 kW 的阻性负载,0.3 s 时,切除 C 相负载,仿真结果见图 6。图 6(a)中,在负载切出时,电压经过短暂的波动,达到平衡;图 6(b)为变流器电感电流与第四桥臂电流,可以看到,C 相负载切除后,第四桥臂为零序电流提供了通路,而其他两相负载没有受到影响。整个过程电压 THD 较小,满足并网标准。

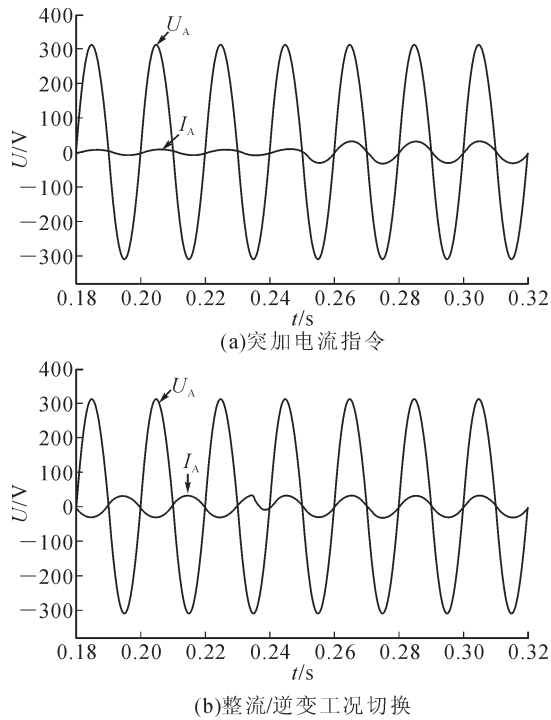


图5 并网模式下的电流动态响应与整流/逆变模式切换

Fig. 5 Current response inverter condition and switching rectifier condition to inverter condition under grid-tied mode

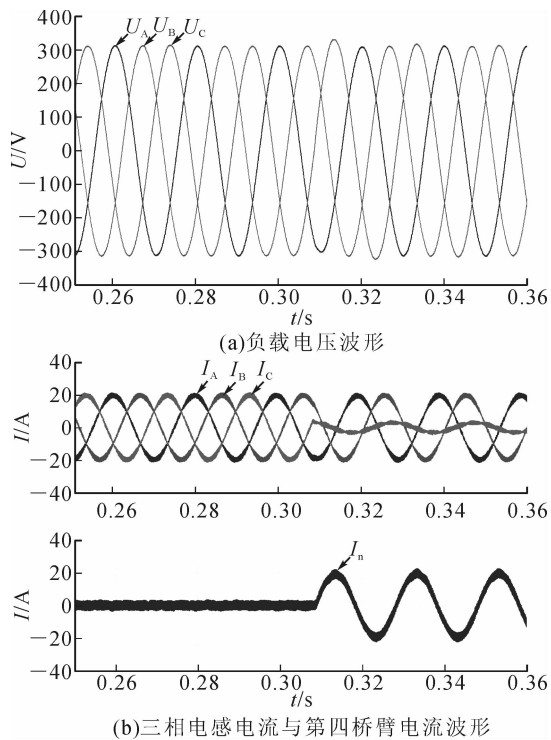


图6 离网模式下负载不平衡时的电压与电流波形

Fig. 6 Output voltage and current waveforms of islanding mode under unbalanced loads

3.2 模式切换仿真

设计了以下仿真,A相接入5 kVA负载,B相接入2.5 kVA负载,C相接入1 kVA负载,功率因数均

为0.8(感性)。用来验证四桥臂变流器在负载不平衡情况下切换的性能。

并网转换为离网的过程见图7。并网状态给定电流为峰值20 A,0.2 s时PCC点开关断开,0.205 s时主控制器检测到孤岛,切换到离网模式。图7(a)中,三相电压有短暂的波动,经过2个周期恢复正常,输出电压保持平衡。图7(b)所示为电感电流与第四桥臂电流波形。整个过程中,电流响应快,没有冲击。

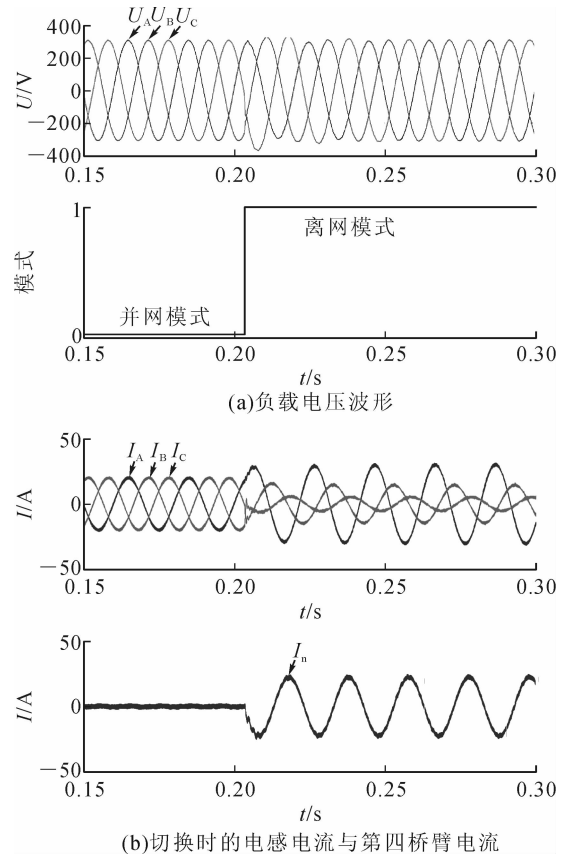


图7 并网模式转换为离网模式

Fig. 7 From grid-tied mode to islanding mode operation

离网向并网模式转换的过程见图8。0.2 s时电网电压恢复,控制器调节输出电压的相位,当变流器输出电压与电网电压同相时,转为并网状态,PCC点开关闭合,此过程如图8(a)所示。图8(b)所示仍为变流器电感电流与第四桥臂电流,切换后变流器输出电流由零,逐渐上升至正常电流20 A,可以看出切换过程平稳,没有电压与电流的冲击,并网后三相电流平衡,第四桥臂的电流变为零。从图7、8所示的模式切换过程可以看出,在切换过程中,变流器动态性能较好,电压波动较小,没有冲击电流,变流器工作稳定,实现了双模式运行。

4 结语

文中对三相四桥臂双模式变流器控制策略进

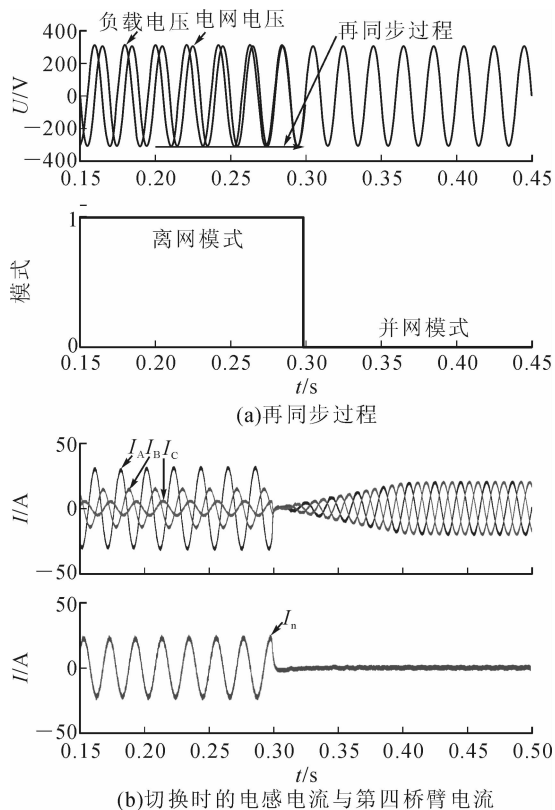


图 8 离网模式转换为并网模式

Fig. 8 From islanding mode to grid-tied mode operation

行了研究。在并网模式下,采用前馈解耦的电感电流闭环直接控制输出功率;在离网模式下,采用输出电压的正负序双同步坐标系控制和基于比例谐振控制器的零序电压控制策略,抑制不平衡负载带来的负序与零序电压分量。变流器依据微网控制器的指令进行模式切换,通过离网时虚拟 PLL 与并网 PLL 的调节以及各模式控制器的快速调节,避免切换过程中的负载电压与电流产生较大冲击。

最后对双模式运行与切换策略进行了仿真,仿真结果表明,三相四桥臂双模式变流器能够实现并网、离网运行及无缝切换,适合在微网中的应用推广。

参考文献:

- [1] VECHIU I, CUREA O, LLARIA A, et al. Control of power converters for microgrids[J]. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2011, 30(1): 300-309.
- [2] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [3] 肖朝霞. 微网控制及运行特性分析[D]. 天津: 天津大学, 2009.

XIAO Chaoxia. Control and operation characteristic analysis

of a microgrid[D]. Tianjin: Tianjing University, 2009.

- [4] 王玉斌, 陈建良. 基于 LCL 滤波器的并网/独立双模式控制高性能逆变器的设计与并联技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 110-114.
- WANG Yubin, CHEN Jianliang. High performance LCL-based utility-interactive inverter design and parallel applications[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 110-114.
- [5] 过亮, 许爱国, 谢少军. 间接电流控制独立/并网双模式逆变器研究[J]. 电力电子技术, 2008, 42(4): 36-38.
- GUO Liang, XU Aiguo, XIE Shaojun. Research on indirect current control algorithm for grid-connected inverter[J]. Power Electronics, 2008, 42(4): 36-38.
- [6] 杨子龙, 伍春生, 王环. 三相并网/独立双模式逆变器系统的设计[J]. 电力电子技术, 2010, 44(1): 14-16.
- YANG Zilong, WU Chunsheng, WANG Huan. Design of three-phase inverter system with double mode of grid-connection and stand-alone[J]. Power Electronics, 2010, 44(1): 14-16.
- [7] 蒋冀, 段善旭, 陈仲伟. 三相并网/独立双模式逆变器控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 52-58.
- JIANG Ji, DUAN Shanxu, CHEN Zhongwei. Research on control strategy for three-phase double mode inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 52-58.
- [8] SHENGLI H, LI K, HAIPING X. Control algorithm research on seamless transfer for distributed resource with a LCL filter[C]//3rd International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies. [S.l.]: IEEE, 2008: 2810-2814.
- [9] CHEN C L, WANG Yubin, LAI J, et al. Design of parallel inverters for smooth mode transfer microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(1): 6-15.
- [10] 刘志文, 夏文波, 刘明波. 基于复合储能的微电网运行模式平滑切换控制[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 906-913.
- LIU Zhiwen, XIA Wenbo, LIU Mingbo. Control method and strategy for smooth switching of microgrid operation modes based on complex energy storage[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 906-913.
- [11] 梁建钢, 金新民, 吴学智, 等. 微电网逆变器 VCS 模式与 CCS 模式的切换技术[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 830-837.
- LIANG Jiangang, JIN Xinmin, WU Xuezhi, et al. Switching technology between VCS mode and CCS mode of inverters in microgrids[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 830-837.
- [12] 刘建华, 杨洪耕, 张洁, 等. 基于等效参考电流控制的低压微电网控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1529-1535.
- LIU Jianhua, YANG Honggeng, ZHANG Jie, et al. An equivalent reference current based control strategy for low-

- voltage microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1529-1535.
- [13] 张 晓, 李新宇, 周 睿. 三相四桥臂并联型 APF 无差拍控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 78-83.
- ZHANG Xiao, LI Xinyu, ZHOU Rui. Study on a deadbeat control scheme for three-phase four-leg shunt active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 78-83.
- [14] 刘 飞. 三相并网光伏发电系统的运行控制策略[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- LIU Fei. Research on operation control of three-phase grid connected photovoltaic power system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [15] 张 兴. PWM 整流器及其控制策略的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
- ZHANG Xing. Study on the PWM rectifier and its control strategies[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2003.
- [16] PERALES M A, PRATS M M, PORTILLO R. Three-dimensional space vector modulation in abc coordinates for four-leg voltage source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics Letters, 2003, 1(4): 104-109.
- [17] 孙 进, 侯振义, 苏彦民. 三相四臂对逆变电源控制方法的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 61-65.
- SUN Jin, HOU Zhenyi, SU Yanmin. Study of control method of three-phase four-wire inverter power supply[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(4): 61-65.
- [18] 杨晓波, 邬伟扬. 三相四桥臂逆变器输出电压负序分量抑制研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41(5): 22-23.
- YANG Xiaobo, WU Weiyang. Suppressing of the negative sequence output voltages for the three phase four legs inverter[J]. Power Electronics, 2007, 41(5): 22-23.
- [19] GANNETT R A, SOZIO J C, BOROYEVICH D. Application of synchronous and stationary frame controllers for unbalanced and nonlinear load compensation in 4-leg inverters[C]//17th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. [S.l.]: IEEE, 2002: 1038-1043.
- [20] TIRUMALA R, MOHAN N, HENZE C. Seamless transfer of grid-connected PWM inverters between utility interactive and stand-alone modes[C]//17th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. [S.l.]: IEEE, 2002: 1081-1086.

陶 艳(1980—), 女, 副教授, 主要研究方向为电气工程、自动控制。

(上接第 180 页)

- 例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- SHI Feng, WANG Hui, YU Lei, et al. Analysis of 30 cases of MATLAB intelligent algorithm[M]. Beijing: Beihang University Press, 2011.
- [16] 金培源, 高波涌, 陈慧娟. 一种黄金分割优化的极限学习机算法[J]. 中国计量学院学报, 2014, 25(2): 209-212.
- JIN Peiyuan, GAO Boyong, CHEN Huijuan. A new extreme learning machine based on the golden section optimization algorithm[J]. Journal of China Jiliang University, 2014, 25(2): 209-212.
- [17] 陈立军, 孙 凯, 侯媛媛, 等. 基于极限学习机的汽轮机故障诊断[J]. 化工自动化及仪表, 2013, 40(4): 435-438.
- CHEN Lijun, SUN Kai, HOU Yuanyuan, et al. Fault diagnosis of steam turbine based on extreme learning machine[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2013, 40(4): 435-438.
- [18] 高相铭, 刘付斌, 杨世凤. 基于极限学习机的供水管网故障智能诊断方法[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(8): 2887-2891.
- GAO Xiangming, LIU Fubin, YANG Shifeng. Intelligent fault diagnosis of water supply network based on ELM[J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(8): 2887-2891.
- [19] 毛文涛, 赵中堂, 贺欢欢. 基于隐特征空间的极限学习机模型选择[J]. 计算机应用, 2013, 33(6): 1600-1603.
- MAO Wentao, ZHAO Zhongtang, HE Huanhuan. Model selection of extreme learning machine based on latent feature space[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(6): 1600-1603.
- [20] 尹金良. 基于相关向量机的油浸式电力变压器故障诊断方法研究[D]. 河北: 华北电力大学, 2013.
- YIN Jinliang. Research on fault diagnosis method of power transformer based on relevance vector machine[D]. Hebei: North China Electric Power University, 2013.
- 袁海满(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事变压器状态评估与绝缘监测方面的研究。