

DOI: 10.7667/PSPC170581

火电厂低压辅机变频器低电压穿越测试装置研究与应用

徐在德, 范瑞祥, 潘建兵, 曹蓓, 邓才波, 李升健

(国网江西省电力公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要: 为了提高火电厂低压辅机变频器低电压穿越水平, 有效解决传统多绕组变压器切换结构的电压跌落装置控制跌落时间不精确、合闸过程励磁涌流大等诸多问题, 研制了容量为 30 kW 的火电厂低压辅机变频器低穿测试装置。设计了三相四桥臂背靠背电力电子拓扑结构, 采用自适应模糊 PI 控制算法, 准确设置电压跌落幅值及时间, 通过上位机控制实现自动循环周期测试。装置在江西某火电厂开展低压辅机变频器改造前后低电压穿越现场实验, 证明电力电子式电压跌落装置动态响应速度小于 5 ms, 逆变输出电压谐波含有量小于 0.5%, 操作便捷、保护策略完备可靠。

关键词: 电力电子; 低电压穿越; 逆变器; 自适应模糊 PI

Research and application of low voltage ride through testing device for low voltage frequency converter in thermal power plant

XU Zaide, FAN Ruixiang, PAN Jianbing, CAO Bei, DENG Caibo, LI Shengjian
(State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: In order to improve the low voltage ride through level of the low voltage auxiliary frequency converter in the thermal power plant and effectively solve problems like the inaccurate time of voltage drop device, which is controlled by the switching structure of the traditional multi-winding transformer, and large inrush current during the closing process, a 30 kW testing device for low voltage auxiliary frequency converter in the thermal power plant is developed and a three-phase four-wire back-to-back power electronic topology is designed, together with adaptive fuzzy PI control algorithm. They can accurately set the voltage dip amplitude and time, achieving automatic cycle test controlled by upper computer. A low voltage ride through scene experiment has been carried out on low-voltage auxiliary frequency inverter both before and after the transformation in a thermal power plant in Jiangxi Province. It proves that the dynamic response speed of power electronic voltage drop device is less than 5 ms, the inverter output voltage harmonic content is less than 0.5%. What's more, the operation is convenient and the protection strategy is complete and reliable.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Jiangxi Electric Power Company — “Research and Application of LVRT Detection System of First-class LV Auxiliary Frequency Converter in Thermal Power Plant” (No. 52182015000G).

Key words: power electronics; low-voltage ride through; inverter; adaptive fuzzy PI

0 引言

目前火电机组辅机普遍采用变频器, 其在实现电动机的无极调速、辅机软启动和经济运行等方面具有极大的优势^[1-2], 火电机组低压辅机变频器低电压穿越能力较差, 多数不具备低电压穿越能力^[3]。2011 年 1 月, 某火力发电厂室外互感器损坏导致电

网 500 kV 系统接地故障, 给煤机电源跳闸造成正在运行的本厂和周边电厂各 1 台 600 MW 机组停机, 对电网安全运行构成巨大威胁; 某石化公司热电厂变频控制的锅炉给粉机在厂用电停电切换或系统晃电的情况下, 出现给粉机全停导致锅炉停炉的事故, 给机组和化工装置生产造成巨大的损失^[4-6]。

火电厂长期在易燃、易爆、高温、高压环境下连续运行, 突发的电网电压跌落或瞬间掉电事故都会造成装置和关键设备的重大损坏, 同时 DCS 内的连锁反应较为复杂, 一台变频器控制的辅机停机都会影响到整个机组的正常运行, 而当电网发生电压

基金项目: 国网江西省电力公司科技项目资助“火电厂一类辅机低压变频器低电压穿越检测系统研究与应用”(52182015000G)

波动或者厂用电系统内部发生故障, 如雷击、电气设备短路和接地等导致电压波动时, 都会因变频器高、低电压穿越不满足要求造成发电机组停机事故。华北电力大学、中船重工 718 所、甘肃电科院、黑龙江电科院等高校院所开展了火电厂低压辅机变频器低电压穿越改造方案对比分析, 但未开展火电厂低压辅机变频器电压跌落测试装置方面的研究^[7-8]。目前常用的变压器副边多绕组结构的电压跌落装置不仅体积大、重量重, 尤其在上下开关级差配合不当时, 装置投切引起的励磁涌流对现场运行设备具有较大安全风险。国网江西省电力公司电力科学研究院凭借多年电力电子技术的积累, 开发火电厂辅机变频器低穿测试装置, 采用自适应模糊 PI 控制策略, 克服了传统的 PI 控制器无法保证电压幅值稳态精度及动态性能的问题; 装置拓扑创新地采用背靠背三相四线制桥臂结构, 输出电压具备三相电压同步跌落或者分相电压跌落功能, 实现了电压的幅值、频率、跌落时间的离线设置及在线实时修改参数功能, 完善了循环周期测试功能, 满足了不同场合的需求; 开发电压动态跌落时间小于 10 ms, 电压谐波含有量小于 3% 的电力电子跌落测试装置, 不仅开展了实验室低穿测试, 并在某火电现场开展了低压辅机变频器系统现场测试, 测试证明该装置克服了传统测试的种种限制弊端, 提升了测试效率, 提高了测试精度, 规范了测试流程^[9-11]。

1 电力电子式低电压穿越测试装置系统设计

1.1 传统变频器低穿传统测试方法

传统低电压穿越测试装置试验平台如图 1 所

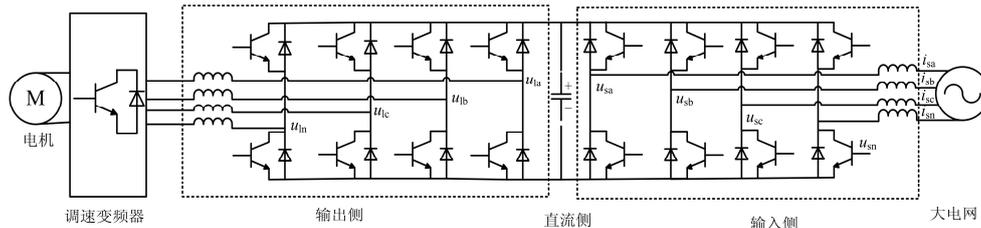


图 1 传统辅机变频器低电压穿越试验平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test platform for traditional auxiliary frequency converter's low-voltage ride through

2 电力电子式电压跌落测试系统

基于电力电子的电压跌落测试系统如图 2 所示, 包括电机、调速变频器、电力电子式电压跌落装置、大电网组成, 其中电力电子式电压跌落装置串联于调速逆变器与大电网中间, 电力电子式电压跌落装置主要由三部分组成, 直流侧、输入侧和输出侧, 其中输入侧及输出侧均为四桥臂 IGBT、滤波电抗器, 直流侧由稳压电容组成。

图 2 电力电子式低穿测试平台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test platform for power electronic low-voltage ride through

电力电子式电压跌落测试装置设计上同时考虑单相、三相变频器低穿测试需求, 采用三相四线制设计不仅满足装置输出侧三相电压同步跌落, 同时具备三相中任一单相电压跌落功能; 输入侧不仅满足单相桥臂吸收大电网能量、稳定直流侧电压功能, 同时考虑单相过载情况, 具备三相同时吸收电网能量功能, 提高了装备的抗过载运行能力, 因而通过三相四线制背靠背拓扑结构, 增加了设备的灵活

性, 增强了现场应用能力, 提高了设备的可靠性^[12-16]。

2.1 自适应 PI 调节器设计

采集电压跌落测试装置输入侧交流电母线上三相电压 $u_a(t)$ 、 $u_b(t)$ 、 $u_c(t)$, 计算出电压的幅值及频率, 通过自适应模糊 PI 调节计算出需要输出电压的幅值及功率, 经过脉冲生成模块产生 16 路脉冲, 控制四个 H 桥工作。如图 4 所示, 该过程包括电压幅值比较单元。其 $u_a^*(t)$ 、 $u_b^*(t)$ 、 $u_c^*(t)$ 和 $u_a(t)$ 、

$u_b(t)$ 、 $u_c(t)$ 的差作为自适应模糊 PI 调节器的输入，其具体的设计方案如下。

自适应模糊 PI 系统是以常规 PI 控制为前提，采用模糊推理思想，将误差 e 和误差变化率 e_c 作为模糊控制器的两个输入量，通过模糊控制器的输出变量，利用模糊规则对 PID 参数进行实时整定，从而使 PID 参数最优，自适应模糊 PID 控制结构如图 3 所示。

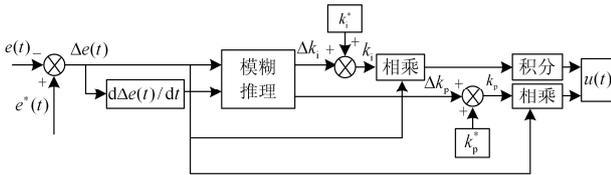


图 3 自适应模糊 PID 控制结构

Fig. 3 Adaptive fuzzy PID control structure

模糊控制的基本思想是对 2 个参数进行实时整定，以满足不同输入误差量 e 和误差变化率 e_c ，确保被控对象有良好的动、静态性能。首先根据经验值设定 k_p^* 、 k_i^* 的值，然后通过模糊推理得到修正值 Δk_p 、 Δk_i ，由经验值和修正值得到最优 k_p 和 k_i 。

$$\begin{cases} k_p = k_p^* + \Delta k_p \\ k_i = k_i^* + \Delta k_i \end{cases} \quad (1)$$

式中： k_p^* 、 k_i^* 为系统的经典 PI 参数； Δk_p 、 Δk_i 为

模糊推理得到的调整值。根据图 3 实现了对 PI 参数的优化，根据 PI 的控制算式，得

$$\Delta e(t) = e^*(t) - e(t) \quad (2)$$

$$\Delta u_a(t) = u_a^*(t) - u_a(t) \quad (3)$$

式中： $u_a^*(t)$ 为 A 相电压设定值； $u_a(t)$ 为 A 相电压采样值。

$$\Delta u_b(t) = u_b^*(t) - u_b(t) \quad (4)$$

式中： $u_b^*(t)$ 为 B 相电压设定值； $u_b(t)$ 为 B 相电压采样值。

$$\Delta u_c(t) = u_c^*(t) - u_c(t) \quad (5)$$

式中： $u_c^*(t)$ 为 C 相电压设定值； $u_c(t)$ 为 C 相电压采样值。

$$u(t) = k_p \Delta e(t) + k_i \int_0^t \Delta e(t) dt \quad (6)$$

式中： k_p 为比例系数； k_i 为积分系数。

电力电子式低电压穿越测试装置控制系统如图 4 所示。输入侧通过四象限控制模块实时采集电压、电流、直流侧电压等参数，计算直流侧电压的差值，控制输入侧吸收电流的大小及方向，稳定直流侧电压；输出侧由采集单元实时采集三相电压的幅值、频率、相位，计算单元按照设定的三相或者分相电压的幅值及功率，通过自适应模糊 PI 调节器使输出侧电压幅值、频率参数实时动态跟踪设定值，实现电压幅值、频率、电压跌落时间实时调节的电压源。

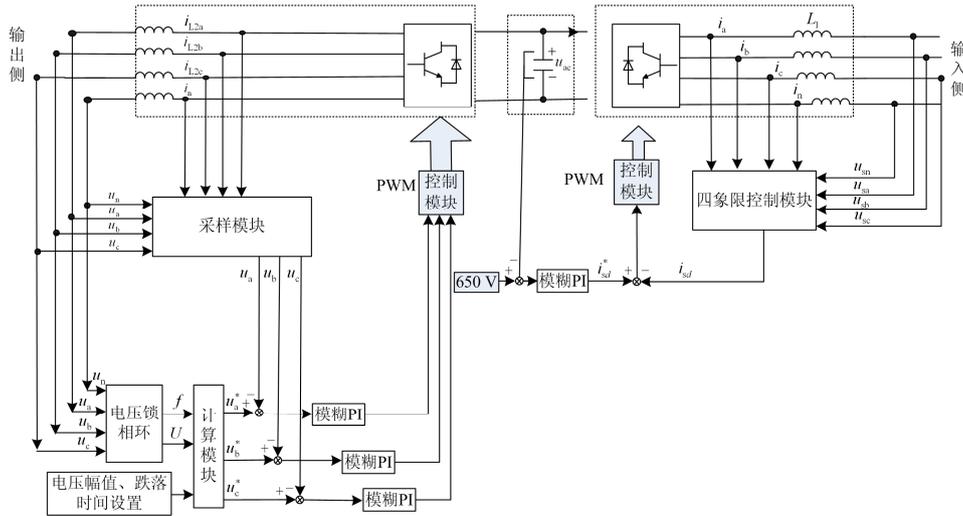


图 4 电力电子式电压跌落测试装置控制系统

Fig. 4 Control system of test equipment for power electronic voltage dip

3 装置开发

3.1 装置参数设计

如图 5 所示，研发 30 kW 电压跌落装置，输出侧滤波电感 0.2 mH，输入侧滤波电感 0.15 mH，直

流侧电容电压 650 V，输入、输出侧均有急停开关，同时具备上位机实时交互功能。

3.2 装置功能开发

3.2.1 上位机开发

上位机设定装置控制指令、参数设置及显示功能，

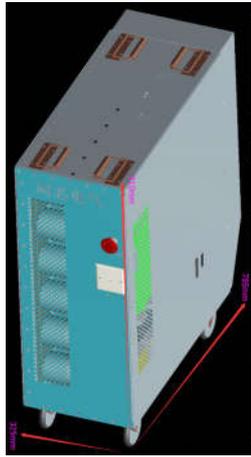


图 5 低穿测试装置实物图

Fig. 5 Physical map of test devices for low-voltage ride through

其中控制指令包括网侧启/停、AC 侧启/停、故障复位和运行模式; 参数设置主要包括电压、电流保护定值, 直流侧电压, 输出电压幅值、频率等。根据被测逆变器功率的不同, 设定不同的保护定值, 上位机界面显示各部分电压、电流、功率数值及波形。

3.2.2 装置保护定值设定

装置具备完善的过、欠压、过电流保护功能, 在发生故障时能够及时地停机保护, 图 6 为装置启动后稳定运行工况波形图, 输出线电压有效值 250 V, 波形平稳, 谐波含有量 THD 小于 2%, 其中蓝色波形为 U_{ab} , 红色波形为 U_{bc} 。如图 7 所示, 输出电压保护定值有效值设置 320 V, 当输出电压超过保护定值时, 电压跌落测试装置立刻自动保护停机。如图 8 所示, 输出侧电流保护定值设置有效值 40 A, 其中绿色波形为 A 相电流波形, 当输出电流超过保护定值时, 电压跌落测试装置立刻自动停机保护。

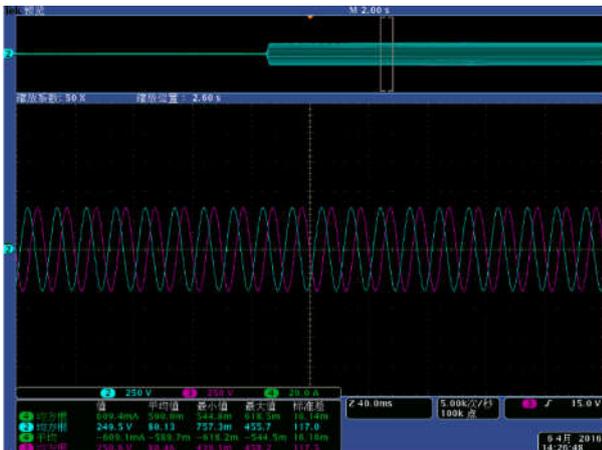


图 6 正常电压波形

Fig. 6 Normal voltage waveform

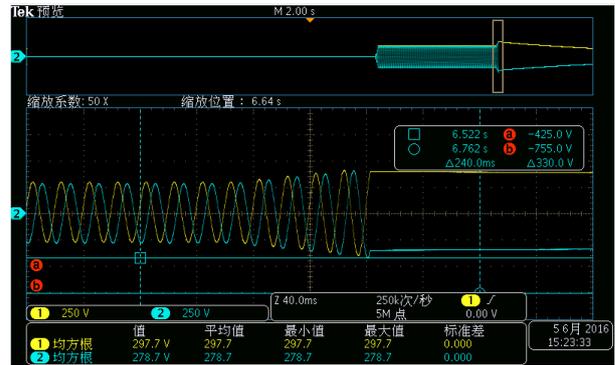


图 7 过压保护波形

Fig. 7 Overvoltage protection waveform

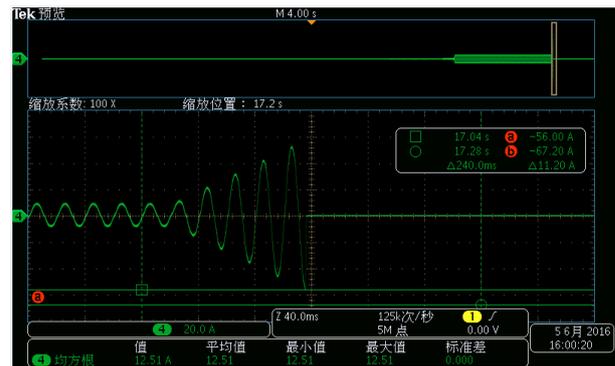


图 8 过流保护波形

Fig. 8 Overcurrent protection waveform

4 实验

4.1 装置性能试验

电力电子式低穿测试系统开展频率偏移试验、单相电压跌落试验、20%、60%、90%、130%三相电压跌落试验, 其中蓝色曲线为 U_{ab} 线电压, 红色曲线为 U_{bc} 线电压, 由图 9 可知, 装置输出模拟三相线电压中 U_{ab} 单电压跌落, 动态响应时间小于 5 ms; 图 10 为输出电压 55 Hz 的频率偏移波形, 电压波形平滑, 频率稳定; 图 11—图 14 分别为电压跌落 20%、60%、90%、130%的试验波形图, 由波形可见, 电压动态切换瞬间小于 5 ms, 输出波形标准, 无毛刺。

4.2 现场测试试验

在江西某火电厂开展低压辅机变频低电压穿越现场测试实验, 其中被测变频器功率为 5.5 kW, 三相输出交流电压为 342~528 V, 电流最大值为 14 A; 电力电子电压跌落装置设置输出线电压为 380 V, 20%电压跌落持续 0.5 s, 60%电压跌落持续 5 s, 90%电压跌落持续 60 s, 130%电压暂升持续 5 s。

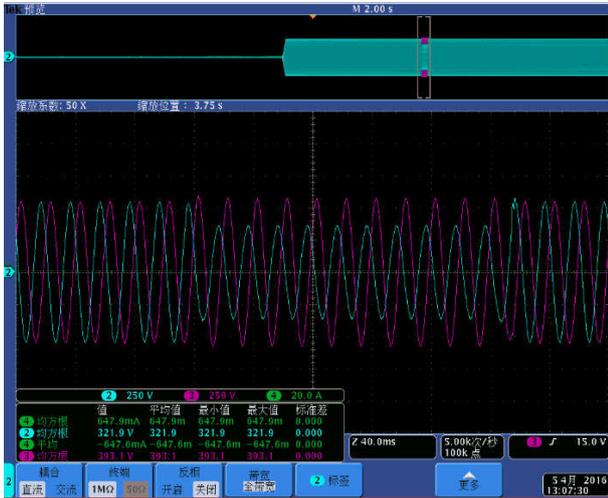


图 9 单相电压跌落波形

Fig. 9 Single-phase voltage drop waveforms

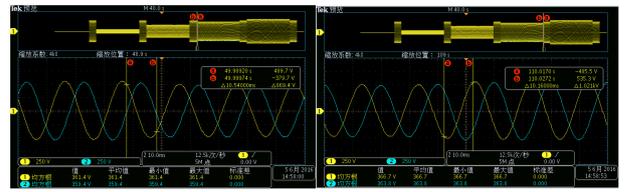


图 13 90%电压跌落及恢复波形

Fig. 13 90% voltage drop and recovery waveforms

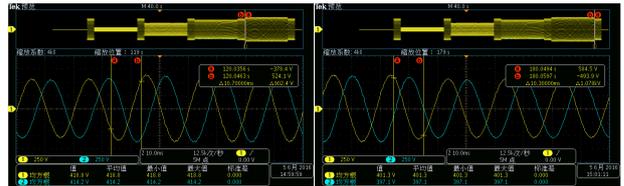


图 14 120%电压跌落及恢复波形

Fig. 14 120% voltage drop and recovery waveform



图 10 频率变化波形

Fig. 10 Frequency variation waveforms

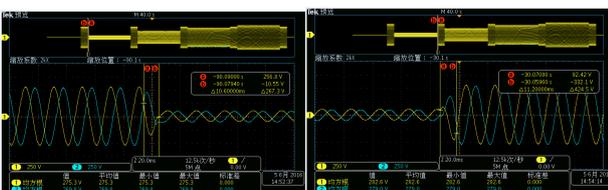


图 11 20%电压跌落及恢复波形

Fig. 11 20% voltage drop and recovery waveforms

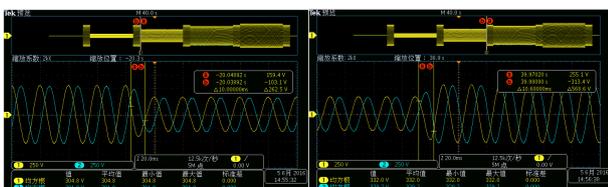


图 12 60%电压跌落及恢复波形

Fig. 12 60% voltage drop and recovery waveforms

由图15可以看出，低压辅机变频器改造前，在电网电压降低到 90%时，变频器直流侧电压跌落至 488 V，跌幅为 16.6%，变频器电压输出正常，输出电流在电压跌落及恢复的瞬间有抖动现象，变频器未发出故障报警，运行正常；图 16 在电网电压跌落到 60%时，变频器在 0.09 s 直流侧电压跌落至 344 V，逆变器输出电压为 0 V，闭锁停机，电网电压恢复正常后，变频器经过 0.06 s 后重启成功，发出欠压故障报警；图 17 在电网电压降低到 20%时，变频器在 0.09 s 时，直流侧电压跌落至 328 V，逆变器输出电压为 0 V，闭锁停机，电网恢复正常之后，变频器未恢复，发出自动重启失败故障报警；图 18 在电网电压暂升到130%时，直流侧电压升至 744 V，逆变器电压输出正常，在电网电压暂升过程中，输出电流瞬间增大一倍，变频器未发出故障报警。

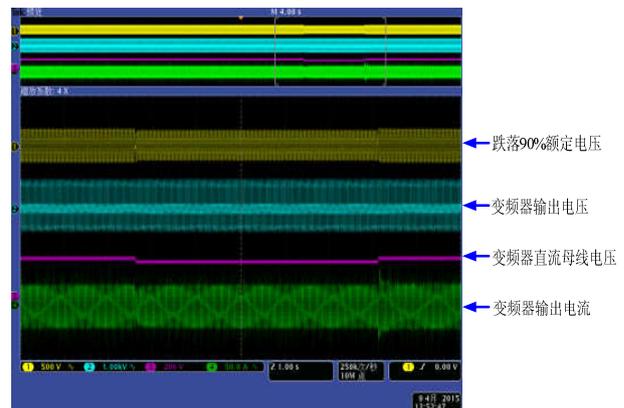


图 15 改造前 90%额定电压测试结果

Fig. 15 90% rated voltage test results before transformation

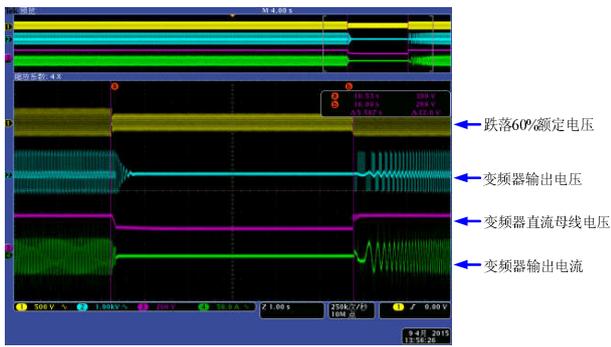


图 16 改造前 60%额定电压测试结果

Fig. 16 60% rated voltage test results before transformation



图 17 改造前 20%额定电压测试结果

Fig. 17 20% rated voltage test results before transformation

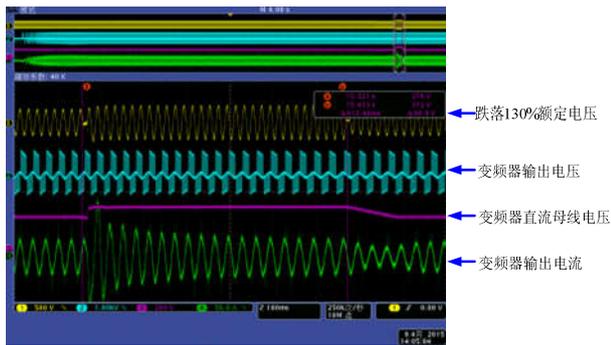


图 18 改造前暂升 130%额定电压测试结果

Fig. 18 130% rated voltage swell test results before transformation

低压辅机变频器改造后, 图19 在逆变器输入电压降低至 90%时, 电压跌落时间持续时间 60 s, 变频器输出电压跌落 20 V 左右, 给煤机系统运行正常; 图 20 在变频器输入电压降低到 60%时, 电压跌落时间持续时间 5 s, 变频器输出电压跌落 30 V 左右, 给煤机系统运行正常; 图 21 在电网电压降低到 20%时, 电压跌落时间持续时间 0.5 s, 变频器输出电压跌落 30 V 左右, 给煤机系统运行正常; 图 22 在电网电压降低到 0%时, 电压跌落时间持续时间 10 s, 变频器输出电压跌落 30 V 左右, 给煤机系统运行正常; 图 23 在电网电压暂升到 130%时,

电压跌落时间持续时间 5 s, 变频器输出电压聚升 40 V 左右, 给煤机系统运行正常, 其中红色波形为电网电压, 黄色波形为给煤机逆变器输出电压。

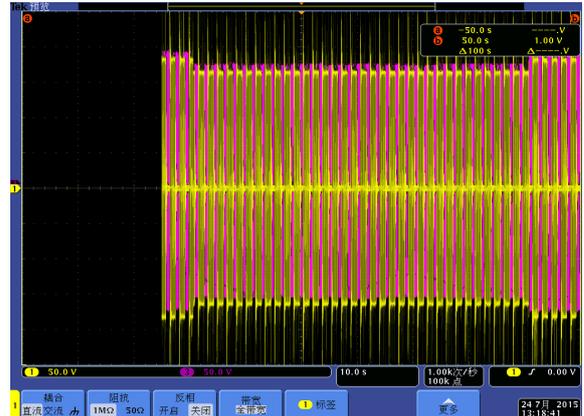


图 19 改造后电压跌至 90%额定电压

Fig. 19 After transformation, the voltage dips to 90% rated voltage



图 20 改造后电压跌至 60%额定电压

Fig. 20 After transformation, the voltage dips to 60% rated voltage

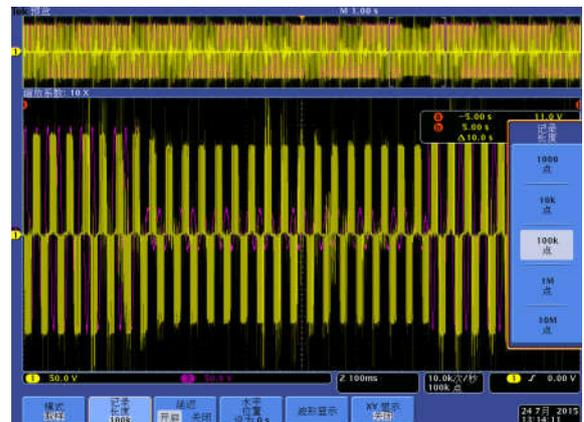


图 21 电压跌至 20%额定电压

Fig. 21 Voltage dips to 20% of rated voltage

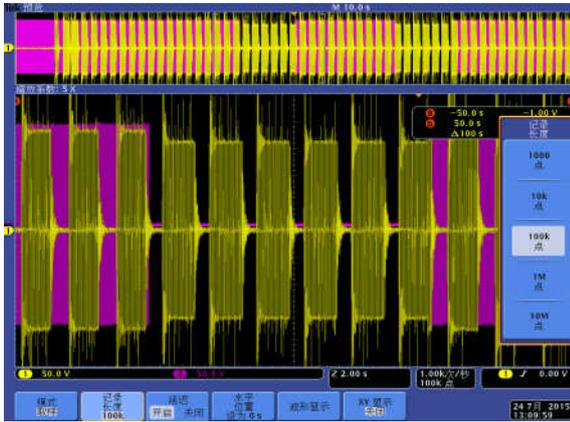


图 22 电压跌至 0%额定电压
Fig. 22 Voltage dips to 0% of rated voltage

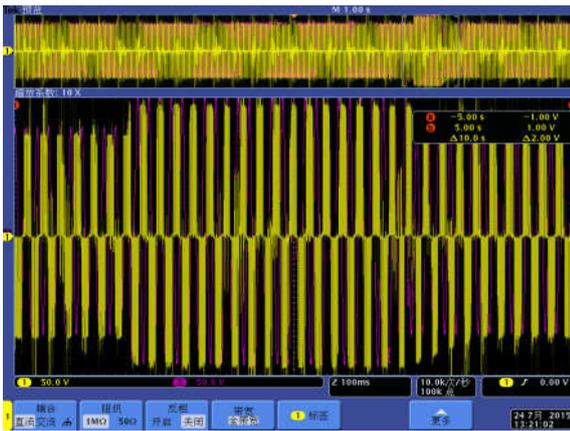


图 23 电压跌至 130%额定电压
Fig. 23 Voltage dips to 130% of rated voltage

5 结论

采用电力电子全控型开关器件和电力电子变流技术的电压跌落装置，控制策略采用模糊自适应 PI 控制，提高了输出电压响应速度，电压输出精度高，避免了传统测试装置因励磁涌流引起的火电厂安全运行的潜在风险。所研发电力电子式电压跌落装置操作简便，体积小，重量轻，自动化程度高，在江西某火电厂开展低压辅机变频器低电压穿越现场测试，输出电压稳定，电压动态响应速度快，满足现场测试需求，现场测试效果良好。该装置不仅可以在电厂开展低压辅机变频器系统的低电压穿越能力测试，并取得良好的经济效益和社会效益，同时还可以推广到其他行业的低压变频器开展相关测试。

参考文献

[1] 王晓宇, 张涛, 刘树, 等. 火电厂辅机变频器低电压穿越电源[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 152-158.

WANG Xiaoyu, ZHANG Tao, LIU Shu, et al. Power source with low-voltage ride-through capability for auxiliary equipment inverter of thermal power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 152-158.

[2] 庞胜汉, 江伟. 防低电压穿越装置在给煤变频器上的应用[J]. 电气技术, 2013, 14(3): 89-93.

[3] 刘耀中, 马永岗, 王国庆, 等. 火电厂辅机变频器低电压穿越电源的设计[J]. 电力电子技术, 2014, 48(11): 13-15.

LIN Yaozhong, MA Yonggang, WANG Guoqing, et al. A design of low voltage ride through power supply based thermal power plant auxiliary transducer[J]. Power Electronics, 2014, 48(11): 13-15.

[4] 张彦凯, 智勇, 拜润卿, 等. 火电厂辅机变频器低电压穿越能力的研究[J]. 电气传动, 2014, 44(11): 55-58.

ZHANG Yankai, ZHI Yong, BAI Runqing, et al. Research of thermal power plant auxiliary machine's converter low voltage ride through capability[J]. Electric Drive, 2014, 44(11): 55-58.

[5] 马海啸, 叶海云, 龚春英. 三相四桥臂逆变器的三角波辅助控制策略[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(1): 14-21.

MA Haixiao, YE Haiyun, GONG Chunying. Control strategy of three-phase four-leg inverter using an auxiliary triangle waveform[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(1): 14-21.

[6] 胡存刚, 胡军, 马大俊, 等. 三电平光伏并网逆变器 SHEPWM 优化控制方法[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(7): 74-81.

HU Cungang, HU Jun, MA Dajun, et al. Optimized control method for three-level photovoltaic grid-connected inverter using SHEPWM[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(7): 74-81.

[7] 张勤进, 刘彦呈, 王川, 等. NPC 光伏并网逆变器共模电流抑制方法研究[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(8): 15-21.

ZHANG Qinjin, LIU Yancheng, WANG Chuan, et al. Study of leakage current suppression method based on NPC photovoltaic grid-connected inverter[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(8): 15-21.

[8] 戴鹏, 吴斌, 苏良成, 等. 基于新型 SVPWM 的 NPC/H 桥五电平逆变器共模电压抑制策略研究[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(2): 20-25.

DAI Peng, WU Bin, SU Liangcheng, et al. Reducing common mode voltage for NPC/H-bridge five-level inverter based on novel SVPWM strategy[J]. Electric

- Machines and Control, 2015, 19(2): 20-25.
- [9] 付伟, 刘天琪, 李兴源, 等. 静止无功补偿器运行特性分析与控制方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 147-154.
FU Wei, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Analysis of operating characteristic and survey of control methods used in static var compensator[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 147-154.
- [10] 章勇高, 龙立中, 陈长龙, 等. 基于改进型 SVPWM 的五电平 NPC/H 变流器共模电压抑制技术研究[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(11): 52-57.
ZHANG Yonggao, LONG Lizhong, CHEN Changlong, et al. Eliminating common-mode voltage of NPC/H inverter based on modified SVPWM strategy[J]. Electric Machines, 2012, 16(11): 52-57.
- [11] 王鹤, 李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 19-23.
WANG He, LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 19-23.
- [12] 汤伟, 刘路登, 殷骏, 等. 火电机组辅机变频调速系统低电压穿越测试[J]. 中国电力, 2016, 48(2): 26-30.
TANG Wei, LIU Ludeng, YIN Jun, et al. Testing study on the low voltage ride-through capability of thermal power unit auxiliary machinery variable frequency speed-regulating system[J]. Electric Power, 2016, 48(2): 26-30.
- [13] 陈钊. 矿用高压交流变频电传动负载特性试验装置设计[J]. 电机与控制学报, 2015, 42(4): 75-79.
CHEN Zhao. Design on load characteristic test device of mine high-voltage alternating variable frequency electric drive[J]. Electric Machines & Control Application, 2015, 42(4): 75-79.
- [14] 张海鹏, 林舜江, 刘明波, 等. 低压配电网无功补偿及效益评估系统的开发及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 129-136.
ZHANG Haipeng, LIU Shunjiang, LIU Mingbo, et al. Development of low voltage distribution networks reactive power compensation and benefit assessment system and its application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 129-136.
- [15] 邢姗姗, 田素立, 王振华, 等. 光伏 MPPT 系统电压控制器的优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 114-118.
XING Shanshan, TIAN Suli, WANG Zhenhua, et al. Optimized design of the voltage controller of PV MPPT system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 114-118.
- [16] LI Ruiqi, GENG Hua, YANG Geng. Fault ride-through of renewable energy conversion systems during voltage recovery[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(17): 28-39.

收稿日期: 2017-04-21; 修回日期: 2017-08-22

作者简介:

徐在德(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源并网控制技术; E-mail: 357785024@qq.com

范瑞祥(1977—), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向为电力电子装置及新能源并网控制技术。E-mail: ricefan117@126.com

(编辑 魏小丽)