

# 变频器低电压穿越电源的设计与实现

林志法<sup>1</sup>, 宋冬冬<sup>1,2</sup>, 丁来伟<sup>1</sup>, 杜海江<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;

2. 河北科技师范学院机电工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 异步电机变频器应用在一些重要场合时,要求当电网电压跌落,在其启动低电压保护使电动机停机前,维持变频器运行一定时间,给系统其他环节足够的响应处理时间。针对此要求,设计了用于变频器的低电压穿越电源,在功率回路、控制回路、辅助回路等环节进行了严格设计。该电源采用在电网电压跌落时投入供电,电网正常时旁路的工作方式;在投入供电时,采用双单环PI自动闭环控制,提高了设备的响应速度和控制精度;为了提高设备自动运行的可靠性,软件设计上加入了日自检、年自检和故障检测功能。仿真和实验表明,电网电压跌落到变频器可以耐受的额定电压的80%时,低电压穿越电源自动迅速投入进行升压,直至电网电压跌落到额定电压的20%的情况下也能保持运行,输出侧电压响应速度和纹波值均在合理范围之内。

**关键词:** 变频器; 低电压穿越电源; 自动闭环调节; 辅助升压

**DOI:** 10.12067/ATEEE1610062

**文章编号:** 1003-3076(2017)12-0059-06

**中图分类号:** TM922

## 1 引言

变频器通过改变电源的频率来调节输出电压,具有很好的调速和节能性能,配合过压、过流、过载等保护,其在工业生产的很多领域得到应用,如变频空调、冶金行业的大型轧机控制、电梯、高架游览车控制、火力电厂的给煤机等。但是,当电网电压低于一定值(一般为额定电压的80%)时,变频器输出功率严重不足,并发生欠压停机保护,这在某些场合会引起事故,如火力电厂给粉变频电机<sup>[1]</sup>。研制变频器低电压穿越电源是解决该问题的重要手段<sup>[2,3]</sup>。

变频器低电压穿越电源的要求是:正常情况下由电网直接给变频器供电,低电压穿越电源处于热备用状态;当电网电压跌落到一定值时,低电压穿越电源快速启动向变频器提供额定电压和额定功率并维持一定时间;此外,控制回路电源及附件都需要具有低电压穿越能力,防止低电压时控制失效。

文献[4-6]均利用 Boost 升压斩波电路实现低电压穿越功能。文献[4]采集低电压穿越电源的三相交流输入电压,将经坐标变换后得到的正序分量

与启动判据作比较,该方法需要锁相检测,算法较复杂,对 CPU 要求高。文献[5]采用模糊自适应算法计算 IGBT 触发脉宽以使输出电压维持预设值,但模糊控制的控制规则和隶属度函数的整合较为困难,增加了控制难度。文献[6]采集整流电容两侧直流电压作为判据,当电压跌落时,电容会以较慢的速度放电,其电压会滞后于实际电压值,使响应变慢。文献[7-9]在设计控制电源时加装 UPS,但 UPS 需定期维护,且电池对使用环境要求较高,寿命有限,成为系统的薄弱环节,降低系统工作可靠性。

针对以上不足,本文进行了一系列优化设计,如采用宽范围输入控制电源,选择有效的电压采样点,设计全范围闭环无盲区控制策略等,确保设备工作可靠性。

## 2 硬件系统

### 2.1 拓扑结构

低电压穿越电源系统结构如图 1 所示。根据功能,系统可分为功率部分、控制部分。功率部分由总开关电路、整流电路、预充电电路、升压斩波电路、投

收稿日期: 2016-10-31

作者简介: 林志法(1992-),男,山东籍,硕士研究生,研究方向为电力电子技术应用;

杜海江(1971-),男,河北籍,副教授,博导,博士,研究方向为计算机控制、电力电子技术、新能源发电(通讯作者)。

切电路、旁路线路组成;控制部分主要由采样电路、控制器、驱动电路以及控制电源组成。QF合闸上电时,要通过预充电电阻 $R_1$ 对直流电容充电,上电完成后将预充电电阻旁路。采用全桥不控整流,经滤波电容,将直流电送入升压回路。升压回路由三组参数一致的Boost电路并联组成,三组电路的开关管采用交错并联调制方式,即每个升压电路的开关管依次错相 $120^\circ$ 触发,有效减小电感电流脉动和输出电压的波动。在热备用状态,由晶闸管实现低电压穿越电源隔离,并根据设计的控制策略实现投切控制。由于低电压穿越电源的输出端接在变频器的直流母线上,为避免设备待机时变频器直流母线对电容 $C_2$ 、 $C_3$ 充电,加装了防反二极管D。控制器采集功率回路的电压、电流和开关状态,对电压和电流进行闭环调节,对开关进行自动控制,实现系统全闭环控制。控制电源须保证在输入电压降到额定值20%的情况下输出电压仍正常,避免控制器失电停机,采用宽电压输入电源可解决此问题,如光伏专用电源模块,可靠性较高且不需要定期维护。

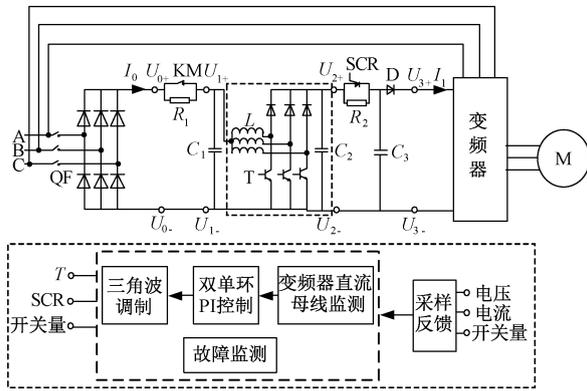


图1 系统结构图

Fig. 1 System structure

## 2.2 主要器件参数选型

升压斩波电路是低电压穿越电源的核心部分,储能电感、滤波电容的参数计算很关键。

电感电流在斩波过程中的纹波大小直接影响低压侧电流的峰值和噪声。同等工况下,若电感电流纹波大,低压侧器件的容量需增大。根据电感电流纹波大小选取电感值,三重升压电路交错并联时,输入电流总纹波的计算步骤如下<sup>[10]</sup>:

输入电流纹波 $\Delta I$ 的表达式为:

$$\Delta I = (1 - ND)D \frac{V_o T_s}{L} \quad (1)$$

式中, $V_o$ 为输出电压; $T_s$ 为IGBT的开关周期; $N$ 为升

压电路的并联数; $D$ 为升压过程中的占空比。

当 $D = (1 + 2k)/(2N)$ , $k \in Z$ 时,输入电流纹波 $\Delta I$ 最大。在本例中,将 $D = 1/6$ , $N = 3$ , $\Delta I = 100\% \times 50A$ , $V_o = 520V$ , $T_s = 10^{-4}s$ 代入式(1)即可反推出电感 $L = 0.086mH$ ,增加裕量后取 $0.1mH$ 。

滤波电容在IGBT导通的瞬间,负责维持输出电压,并抑制输出电压纹波的大小,电容值计算如下<sup>[11]</sup>:

$$C = \frac{I_o D_{max} T_s}{DV_o} \quad (2)$$

式中, $I_o$ 为斩波电路输出电流; $D_{max}$ 为最大占空比, $\Delta V_o$ 为输出电压的纹波。本例中 $D_{max} = 0.81$ , $I_o = 10A$ , $T_s = 10^{-4}s$ , $\Delta V_o = 0.2\% \times 520V$ ,代入式(2)反推出 $C = 800\mu F$ ,增加裕量后取 $1100\mu F$ 。

## 3 工作控制算法

### 3.1 旁路式工作模式

考虑到电网电压在绝大多数时间处于正常状态,不需要辅助升压,低电压穿越电源采用旁路式的工作方式。当电网电压跌落到启动阈值以下时,低电压穿越电源给变频器供电,并可在电网电压跌到正常的20%时仍可工作;电网电压正常时,变频器直接经交流输入端从电网取电工作,低电压穿越电源处于热备用状态。低电压穿越电源投入使用时,控制器上电进入初始化后发出合闸指令,断路器QF、接触器KM相继合闸,然后进行自检,以在上电初期检测设备是否正常,防止将故障设备投入。自检即让设备进行升压斩波工作,将直流母线电压( $U_2$ 处)抬高到给定输出值,若自检失败,发停机指令并将故障信号上传给上位机。自检成功后进入热备用待机状态,随时监测变频器输入电压。设备辅助升压时最大运行时间到达或电网电压恢复后便停止升压,回到热备用待机状态。在设备散热性能满足要求的情况下,最大运行时间可根据要求自行设定,本设备设为1min。

电压监测电路实时监测变频器直流母线电压值,电压值的准确获取对设备可靠性至关重要。图1中 $U_3$ 处是监测电压最合适的位置。 $U_3$ 处连接在变频器的输入直流母线上,及时准确地反应变频器直流母线电压,此处虽有滤波电容,但是与 $U_2$ 相比时间常数很小。当 $U_3$ 小于启动阈值时,设备启动升压。启动阈值需根据变频器的低电压保护阈值确定,变频器低电压保护阈值一般为额定电压的

80%, 所以启动阈值一般应高于额定电压的 80%, 在变频器启动低压保护之前向变频器供电。设备是否退出升压斩波需监测  $U_1$  处电压值, 当  $U_1$  处电压高于停止阈值, 且 2s 后仍满足此关系, 便可停止升压。停止阈值大于启动阈值。

普通晶闸管 SCR 导通速度快、电流过零自然关断且通态压降低, 因此, 将它用作低电压穿越电源投入与退出供电的控制开关。检测到变频器的输入电压跌落需进行辅助升压时, 在触发 Boost 升压电路 IGBT 的同时, 触发晶闸管, 待其导通后停止触发, 但此时仍处于通态。当电网电压恢复正常, 设备不再进行升压斩波, 晶闸管中便没有电流流过, 自动关断。

### 3.2 双单环自动控制

升压斩波电路的控制采用双单环 PI 算法, 采样电路将输出电压和电流值送入控制器, 经过 PI 运算后得到 IGBT 的占空比, 与载波进行比较, 输出 IGBT 的触发脉冲, 如图 2 所示。为避免双环控制中外环带宽受限、减小 PI 参数的整定难度, 将电压环和电流环拆为两个独立的控制环, 同一时刻只有一个控制环在运行, 并将 PI 运算后输出的数值作为 IGBT 的触发脉冲占空比。通常设备运行在电压环, 使直流母线电压  $U_2$  工作在给定值  $U_{ref}$ 。若由于过载或短路使输出电流高于电流保护阈值时, 便切换到电流控制环, 进行定电流调节, 输出电压随之降低, 防止设备输出电流过大而被损坏; 当输出负载恢复正常时, 再次切换到电压控制环, 进行定电压工作。

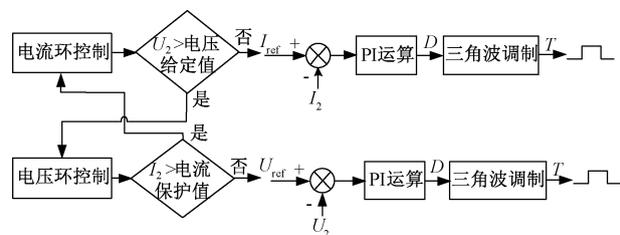


图2 双单环控制算法示意图

Fig. 2 Double single loop control chart

在实际工程中, 常采用增量式 PI 控制算法, 其表达式为:

$$f_n = k_p \Delta e_k + k_i e_k + f_{n-1} \quad (3)$$

$$\Delta e_k = e_k - e_{k-1} \quad (4)$$

式中,  $f_n$  为当前调节周期内的计算输出值, 在本设备中为 IGBT 的触发脉冲占空比;  $f_{n-1}$  为上一个调节周期内的输出值;  $e_k$  为当前调节周期内反馈值与给定值的偏差;  $\Delta e_k$  为当前调节周期的偏差与上一个周期偏差的差值;  $k_p$  为比例系数;  $k_i$  为积分系数。

PI 参数的整定常用试凑法, 双单环的参数分别整定, 且两组参数没有直接联系。整定时, 先令  $k_p$  由 0 逐渐增大, 直至系统出现振荡, 取此时  $k_p$  的 60% ~ 70% 作为最终  $k_p$  值, 之后保持  $k_p$  不变,  $k_i$  由 0 逐渐增大, 待稳态误差为零,  $k_i$  整定结束。

### 3.3 故障自动监测与处理

为提高设备运行的可靠性和安全性, 不论设备处于待机状态或辅助升压状态, 均需及时检测出设备故障并迅速处理。针对设备长时间处于待机热备用状态, 设计了日自检、年自检和运行异常监测功能。日自检即控制器定时启动 Boost 升压功能, 检测输出电压值能否达到设定值, 若达到则表明设备正常, 否则控制器发出跳闸停机指令并上传日自检失败信号, 需进行人工修复后方可工作。年自检即在每年的某个固定时间跳开断路器、接触器, 然后重新合闸上电, 检测开关动作是否正常, 避免由于开关长期备用失灵导致控制异常。运行异常监测即对电压、电流、温度和开关量等进行检测, 将采集到的输入电压、输出电压、输出电流以及机箱温度与预设阈值进行比较, 若超过阈值, 则表明控制异常或设备故障, 需停机处理。断路器 QF、接触器 KM 实时反馈开关量, 并将反馈的开关量与控制器内保存的指令比较, 及时排除不正常状态。

由于控制器具有一定的调节周期, 瞬间扰动 (如负载瞬间扰动、输入电压瞬间扰动等) 引起的过电压和过电流在闭环调节器调节周期内处于失控状态。对于这种异常, 单独设计了硬件保护电路。当电压电流瞬间越限, 比较电路将越限信号传给控制器, 控制器将调节器输出清零。若出现连续多次调节器输出清零处理, 可断定设备已故障, 需停机修复。这样既遏制了故障的发展, 又避免了瞬间干扰导致设备停机。

根据所分析的系统工作机理, 设计了低电压穿越电源的整体控制流程图, 如图 3 所示。

## 4 仿真和实验验证及分析

为了验证所设计功率、控制回路和控制策略的有效性, 设计了仿真和实验系统, 分别如图 4 和图 5 所示。设计参数如表 1 所示, 并设计三种典型测试工况。

(1) 工况一: 经整流后输入的直流电压由 510V, 依次连续跌落到 408V (80%), 255V (50%), 102V (20%), 然后升高到 400V, 最后恢复正常值 510V, 仿真结果如 6 所示, 实验结果如图 7 所示。

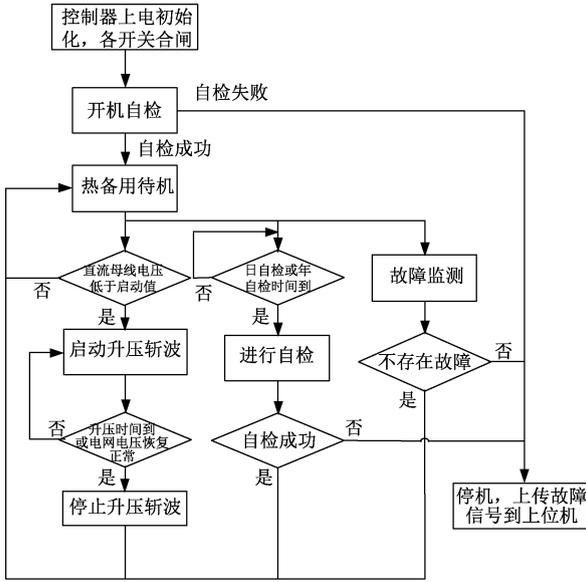


图3 系统控制流程图

Fig. 3 System control process

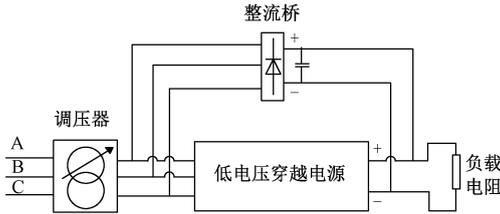


图4 实验原理图

Fig. 4 Architecture of experiment

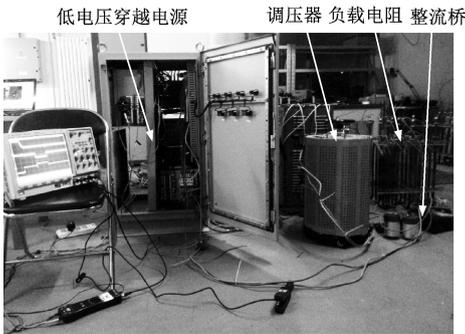


图5 实验设备图

Fig. 5 Hardware setup of experiment

表1 仿真电路参数

Tab. 1 Simulation circuit parameters

参数	数值
正常输入电压/V	510
输出电压给定值/V	520
最大电流给定值/A	16
额定功率/kW	5
每组电感/mH	0.1
滤波电容/ $\mu$ F	1100
滤波电容放电电阻/k $\Omega$	68

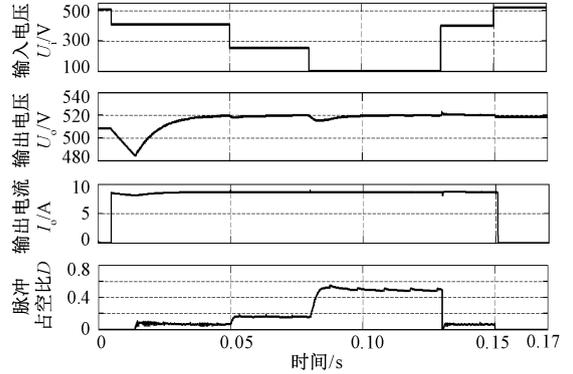


图6 输入电压跌落与恢复过程仿真图

Fig. 6 Simulation result when input voltage drops and reverts to normal

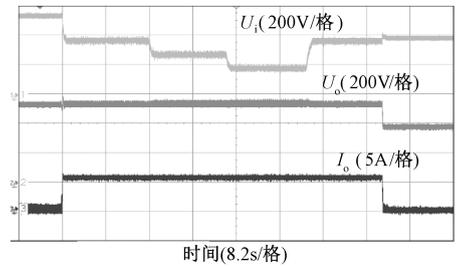


图7 输入电压跌落与恢复过程实验波形图

Fig. 7 Experiment result when input voltage drops and reverts to normal

(2) 工况二: 在输入电压为 102V (20%) 时, 负载变化导致输出功率由正常功率到重载再恢复正常功率, 负载电阻由正常 60 $\Omega$  切换到 30 $\Omega$  再恢复到 60 $\Omega$ , 仿真结果如图 8 所示, 实验结果如图 9 所示。

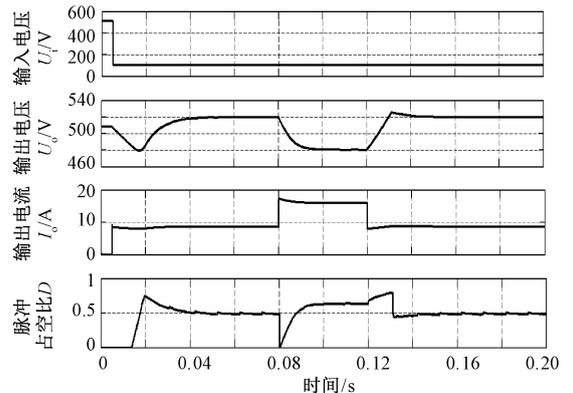


图8 过载时电压环和电流环切换仿真图

Fig. 8 Simulation conversion between current loop and voltage loop when overloaded

(3) 工况三: 输入直流电压由 510V 直接跌落到 104V (20%) 时, 测试  $U_2$  与  $U_3$  处电压的跌落时间,

仿真结果如图 10 所示, 实验结果如图 11 所示。

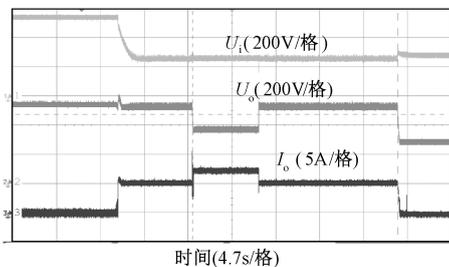


图 9 过载时电压环和电流环切换实验波形图

Fig. 9 Waveforms of conversion between current loop and voltage loop when overloaded

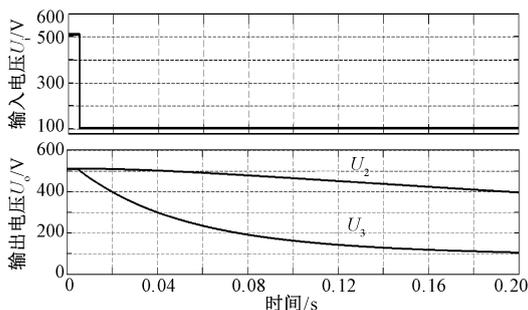


图 10 输入电压跌落时  $U_2$ 、 $U_3$  处电压变化仿真波形图

Fig. 10 Simulation voltage variation of  $U_2$  and  $U_3$  when input voltage dropped

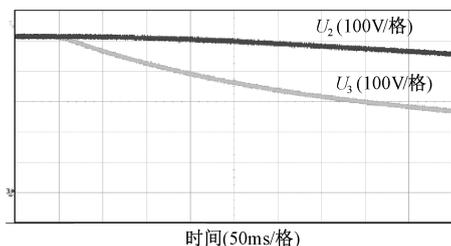


图 11 输入电压跌落时  $U_2$ 、 $U_3$  处电压变化实验波形图

Fig. 11 Experiment voltage variation of  $U_2$  and  $U_3$  when input voltage dropped

由图 6 可知, 当输入由正常值 510V 跌落至 485V, 低电压穿越电源启动, 在 20ms 以内将输出电压抬高到给定值 520V。当输入电压跌落至 255V 和 102V 时, 控制器迅速进行调整, 使跌落瞬间的输出电压均在 5V 以内波动。输入电压再升高到 400V 时, 输出电压回升过快导致瞬间过压, 控制器输出清零, 使电压波动在 10V 以内, 有效避免了输出电压的冲击。输出电压在各个输入电压等级的脉动均小

于 2V。当电压恢复到正常值 510V 时, 低电压穿越电源停止升压。由图 7 也可看出, 输入电压变化时, 输出电压的变化趋势与图 6 相同; 但由于调压器容量有限, 额定负载为 100Ω 时, 输入电压  $U_i$  最低降到 200V。

图 8 中, 输入电压由 510V 跌落到 102V (20%), 控制器工作在电压控制环, 输出电压稳定在 520V。负载由 60Ω 切换到 30Ω, 控制器开始切换到电流控制环, 使得电流稳定在 16A, 电压随之下降; 当负载再次切换到 60Ω 时, 重新切换到电压环控制, 进行定电压控制, 输出电压值重新恢复到给定值 520V。图 9 的实验过程也验证了双环切换的有效性。

图 10 和图 11 中, 电压曲线  $U_2$ 、 $U_3$  分别表示输入直流电压由 510V 跌落到 102V (20%) 时, 图 1 中  $U_2$ 、 $U_3$  处电压的变化情况。从曲线的变化过程可以看出, 当输入电压跌落时,  $U_3$  处电压在输入电压跌落 10ms 以内便跌落到启动判据值以下, 但  $U_2$  处的电压需经过 100ms 才可以到达启动判据。因此, 若选择  $U_2$  处的位置作为电压采样点, 则会严重影响低电压穿越电源投入的速度, 而选择  $U_3$  处便可以及时投入工作。

## 5 结论

(1) 控制电源设计采用宽范围输入电源, 保证控制电源供电可靠性; 通过对电路特征的分析, 找到了实时反映变频器输入电压变化的电压采集点, 提高了设备响应速度。

(2) Boost 升压电路中 IGBT 的触发脉冲占空比调节采用双单环 PI 控制, 算法简单, 响应速度快, 系统鲁棒性好, 在发生过载时, 能够自动保护; 针对低电压穿越电源长时间处于热备用不进行升压工作, 设计了日自检、年自检, 并设计了故障监测功能, 确保长期可靠工作; 对出现的瞬间扰动, 设计了硬件保护电路, 避免出现失控状态。

(3) 仿真和实验结果验证了设计的正确性和控制策略的完备性。

## 参考文献 (References):

- [1] 庞胜汉, 江伟 (Pang Shenghan, Jiang Wei). 防低电压穿越装置在给煤变频器上的应用 (Low Voltage ride through device's application in coal supplying frequency converter) [J]. 电气技术 (Electrical Engineering), 2013, (3): 89-93.

- [2] 张东明,姚秀萍,王维庆,等 (Zhang Dongming, Yao Xiuping, Wang Weiqing, et al.). 含低电压穿越电源的火电厂辅机变频器的研究 (Thermal power plant auxiliary equipment frequency changer using low voltage ride through power source) [J]. 华东电力 (East China Electric Power), 2013, 41 (6): 1345-1347.
- [3] 张彦凯,智勇,安亮亮 (Zhang Yankai, Zhi Yong, An Liangliang). 火电厂辅机变频器低电压穿越能力的研究 (Research of thermal power plant auxiliary machine's converter low voltage ride through capability) [J]. 电气传动 (Electric Drive), 2014, 44 (11): 55-58.
- [4] 刘耀中,马永岗,王国庆,等 (Liu Yaozhong, Ma Yonggang, Wang Guoqing, et al.). 火电厂辅机变频器低电压穿越电源的设计 (A design of low voltage ride through power supply based on thermal power plant auxiliary transducer) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2014, 48 (11): 13-15.
- [5] 郑安 (Zheng An). 电厂变频器用低电压穿越电源研究 (Study on the power supply with LVRT capability for frequency inverters in power plant) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2014.
- [6] 武利俊,林雪欣,刘剑,等 (Wu Lijun, Lin Xuexin, Liu Jian, et al.). 低电压穿越装置在火电厂的应用 (Research of low voltage ride through in thermal power plant) [J]. 内蒙古科技与经济 (Inner Mongolia Science Technology and Economy), 2014, (24): 97-100.
- [7] 王钢,贾伟,郑怀国,等 (Wang Gang, Jia Wei, Zheng Huaiguo, et al.). 具有低电压穿越能力的变频器稳压单元装置 (Voltage stabilizing frequency converter unit device capable of low voltage ride through) [P]. 中国专利 (Chinese Patent): CN 102299644 A, 2011-12-28.
- [8] 栗向鑫 (Li Xiangxin). 火电机组辅机低电压穿越问题研究 (Study on low voltage ride through for auxiliary equipment of thermal power unit) [J]. 华北电力技术 (North China Electric Power), 2014, (10): 43-47.
- [9] 王晓宇,张涛,刘树,等 (Wang Xiaoyu, Zhang Tao, Liu Shu, et al.). 火电厂辅机变频器低电压穿越电源 (Power source with low-voltage ride-through capability for auxiliary equipment inverter of thermal power plant) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2015, 35 (5): 152-158.
- [10] Wu Bing, Lang Yongqing, Zargari Navid, et al. 风力发电系统的功率变换与控制 (Power Conversion and Control of Wind Energy Systems) [M]. 卫三民,周京华,王政,等 (Wei Sanmin, Zhou Jinghua, Wang Zheng, et al.) 译. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2012.
- [11] 梁适安,向琳 (Liang Shi'an, Xiang Lin). 开关电源理论与设计实践 (Theory and design practice of switching power supply theory and design) [M]. 北京: 电子工业出版社 (Beijing: Publishing House of Electronics Industry), 2013.

## Design of LVRT power source for variable frequency drive

LIN Zhi-fa<sup>1</sup>, SONG Dong-dong<sup>1,2</sup>, DING Lai-wei<sup>1</sup>, DU Hai-jiang<sup>1</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinghuangdao 066004, China)

**Abstract:** In some vital situations, before power grid voltage drop leading the frequency converters to stop work, it is necessary to keep frequency converters running for certain time and provide enough time for whole system to deal with urgent situation. Aiming at this demand, low voltage ride through (LVRT) power source for frequency converter is designed. Rigorous design is achieved in power circuit, control circuit and auxiliary circuit. When the power grid drop occurs, LVRT will start to supply power for the converter. When the power grid recovers, it will be bypassed. It takes auto double close loop to lift converters' DC voltage to normal value, lifting the speed of response and the control precision. In software, day self-check, year self-check and abnormal condition protection are designed to guarantee the system's reliability. Simulation and experiment results all show that, when the power grid drops to 80% of rating voltage, LVRT instantly begins to lift output voltage. Even input voltage drops to 20%, it still works normally. Output voltage's reacting time and ripple wave operate in suitable range.

**Key words:** frequency converter; low voltage ride through; automatic closed loop adjustment; auxiliary boost voltage