

基于超级电容的稳压技术对变频器 电压暂降耐受能力研究

蔡春强¹,周海勇²,宋俊毅²,王鑫²,吕常智²

(1. 中国石化齐鲁分公司 生产运行维护中心,山东 淄博 255400;

2. 山东科技大学 电气与自动化工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:变频器是电压暂降敏感负荷之一,由于电力系统电压波动,导致变频器停运事故时有发生。为提高变频器电压暂降的耐受能力,提出以超级电容作为后备支撑,采用史密斯预估补偿算法与模糊控制算法相结合的控制策略,实现了Buck-Boost变换器参数的智能调节,使系统能够迅速响应直流母线变化,并实时保持变频器直流母线电压的稳定。仿真和实验验证结果表明,本研究所提方案原理直观、硬件简单、切换时间短、响应速度快,解决了电压暂降影响变频器平稳运行的问题,可以保证变频器长期平稳运行。

关键词:变频器;电压暂降;超级电容;Buck-Boost变换器;稳压技术

中图分类号:TN929.5

文献标志码:A

Research on voltage sag tolerance of variable frequency drive based on supercapacitor voltage stabilization technology

CAI Chunqiang¹, ZHOU Haiyong², SONG Junyi², WANG Xin², LÜ Changzhi²

(1. Production Operation and Maintenance Center, Sinopec Qilu Petrochemical Company, Zibo 255400, China;

2. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Variable frequency drive (VFD) is one of the voltage transient sensitive loads, and accidents of VFD shutdown due to power system voltage fluctuation happens from time to time. In order to improve the tolerance of the voltage sag of VFD, this paper proposed a supercapacitor as a backup support and adopted the control strategy of combining the Smith's prediction compensation algorithm and the fuzzy control algorithm to realize the intelligent adjustment of the parameters of the Buck-Boost converter, so that the system could respond to the changes of the DC bus quickly and keep the stability of the VFD's DC bus voltage in real time. Through simulation and experimental verification, the results show that the scheme proposed in this paper, which is intuitive in principle, simple in hardware, short in switching time, fast in response, can solve the problem of voltage sag affecting the smooth operation of VFDs and thus ensure a long-term stable operation of VFDs.

Key words: variable-frequency drive; voltage sag; supercapacitor; Buck-Boost converter; voltage stabilization technology

变频器(variable frequency drive, VFD)是一类典型的广泛应用于工业生产的设备,对电压波动比较敏

收稿日期:2023-11-08

基金项目:国家自然科学基金项目(62371274);山东省自然科学基金项目(ZR2023MF004);山东省自然科学基金创新发展联合基金项目(ZR2022LZH001);山东省研究生优质教育教学资源项目(SDYAL2024037);青岛市自然科学基金项目(23-2-1-151-zyyd-jch)

作者简介:蔡春强(1972—),男,山东聊城人,高级工程师,硕士,主要从事炼化电气设备的应用和研究工作。

吕常智(1971—),男,江西兴国人,教授,博士,主要从事电力系统及其自动化、检测技术及其自动化装置、机器人技术和电力电子与电力传动方面的研究工作,本文通信作者。E-mail:lvchangzhi@126.com

感。当电网发生电压暂降时,出于保护和控制目的,变频器易跳闸停机,中断整个生产过程,造成巨大的经济损失^[1-3]。煤气化装置是某炼化企业第二化肥厂的主要生产装置之一,该装置由三台气化炉组成,正常运行“两开一备”,气化能力 $10^5 \text{ m}^3/\text{h}$,年产氢气约 4.3 万吨,是炼油厂装置所需氢气的主要来源,该装置多次因电力系统故障触发变频器保护机制导致气化炉停炉,经济损失巨大。

高压煤浆泵是气化单元的核心设备,其连续、快速、精准调节是气化装置安全、稳定、长周期运行的关键。高压煤浆泵变频驱动及控制原理如图 1 所示。在实际运行中,电力系统的波动是影响高压煤浆泵连续、平稳输出的关键因素^[4]。常见的变频器电压暂降治理措施有在线式不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)和自动电压补偿器(automatic voltage control, AVC)等方式^[5]。本研究基于超级电容储能的方式,围绕高压煤浆泵变频器,从变频器原理、电压暂降耐受程度、直流稳压母线方案的设计及试验结果等内容展开论述。

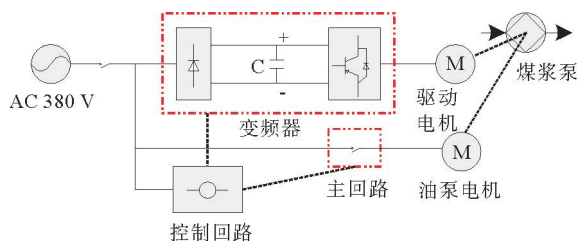


图 1 高压煤浆泵变频驱动及控制原理图

Fig. 1 Schematic diagram of high pressure coal slurry pump VFD and control

1 变频器受电压暂降影响分析

1.1 电压暂降分析

引起电压暂降的原因主要包括变压器投切、感应电机的启动和短路故障,其中短路故障又分为单相接地故障、两相接地故障和三相接地故障^[6]。电压暂降主要分为单相暂降(类型Ⅰ)、两相暂降(类型Ⅱ)和三相不对称暂降(类型Ⅲ)三类^[7-8]。假设电压暂降之前电压为 $\dot{E}$ (用虚线表示),电压暂降之后电压为 $\dot{V}$ (用实线表示),其三相对称电压($\dot{U}_a$ 、 $\dot{U}_b$ 、 $\dot{U}_c$)的表达式和相位图如表 1 所示。

表 1 电压暂降类型表达式与相位图

Table 1 Voltage sag type expressions and phase diagrams

类型	类型Ⅰ	类型Ⅱ	类型Ⅲ
表达式	$\dot{U}_a = \dot{V},$ $\dot{U}_b = -\frac{1}{2}\dot{V} - \frac{\sqrt{3}}{2}j\dot{E},$ $\dot{U}_c = -\frac{1}{2}\dot{V} + \frac{\sqrt{3}}{2}j\dot{E}$	$\dot{U}_a = \dot{E},$ $\dot{U}_b = -\frac{1}{2}\dot{E} - \frac{\sqrt{3}}{2}j\dot{V},$ $\dot{U}_c = -\frac{1}{2}\dot{E} + \frac{\sqrt{3}}{2}j\dot{V}$	$\dot{U}_a = \dot{V},$ $\dot{U}_b = -\frac{1}{2}\dot{V} - \frac{\sqrt{3}}{2}j\dot{V},$ $\dot{U}_c = -\frac{1}{2}\dot{V} + \frac{\sqrt{3}}{2}j\dot{V}$
相位图			

描述电压暂降是把电压暂降幅值和电压暂降持续时间的严重程度作为主要指标^[9],本研究主要针对危害最大的三相对称电压暂降进行分析,电压暂降波形如图 2 所示。

1.2 电压暂降对变频器的影响

变频器主要由整流电路、直流中间电路、逆变电路和控制回路构成^[10]。变频器的拓扑结构如图 3 所示。电压暂降可能导致变频器输出功率不稳定、触发故障保护和功能异常等问题,在正常运行状态中,变频器需要依赖稳定的电压来维持输出功率的稳定。此外,电压暂降对变频器寿命也有影响。当电压暂降时,变频器直流母线电流 i_{inv} 增加会造成温度升高,而长期高温环境会对变频器造成损害,缩短变频器的使用寿命。

因此,为了维持变频器的正常运行,应采取必要措施,提供稳定的电压。

1.3 变频器抗晃电技术的分析与选择

常用的抗晃电技术方式主要有以下几种。

1) 低电压穿越技术。该技术实时监控母线电压,当低电压穿越控制装置检测到电压跌落至一定值时,低电压穿越装置投入运行从而躲过电压暂降时间^[11-12],但只能运用于过载能力强、对电源波动不敏感的场所。

2) 不间断电源(UPS)。UPS 以蓄电池储能装置、整流器和逆变器作为主要组成部分,提供恒压恒频的不间断电源来解决供电线路电压暂降、浪涌、频率漂移等电源问题,但是这种方式成本高,控制回路复杂,通常应用在关键计算机和网络设备等对电力要求苛刻的环境中^[13-14]。

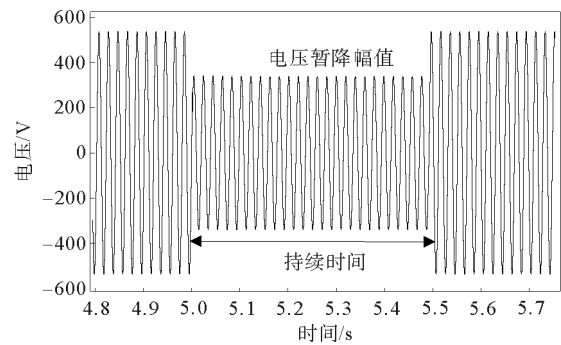


图2 电压暂降波形图

Fig. 2 Voltage sag waveform

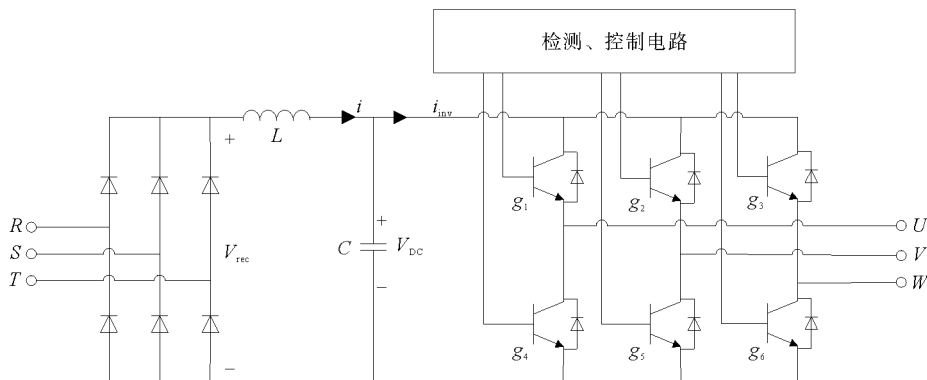


图3 变频器的拓扑结构图

Fig. 3 Topology diagram of the inverter

3) 自动电压补偿器(AVC)。AVC 是一种通过检测电流变化而自动调整电压的电路,能够检测电源输出电压是否达到预设的电压范围,当电压超出范围时,AVC 能够及时调整电压,使得在负荷变动时仍能提供稳定的电压输出^[15]。AVC 调节器常用于办公设备、家用电器以及特种电器等电力系统中。

4) 交流储能切换技术。储能逆变器是一种双向变流器,可以将交流电转换成直流电储存在蓄电池中,当断电时再将直流电转换成交流电供给负载使用^[16]。该方式需要对变频器主回路进行改造,硬件设施复杂,现场施工难度大,尽管系统切换时间可控制在 10 ms 级,但该响应速度难以显著提升变频器的电压暂降耐受能力。

5) 变频器直流支撑技术。该技术借鉴了 UPS 中的储能装置,结合“交-直-交”变频器的特点,对变频器的直流母线进行电压支撑,其拓扑结构简单,可靠性高。

传统的直流支撑技术的储能装置采用的是蓄电池储能,其缺点是蓄电池寿命短、功率特性差。本研究改进传统的直流支撑技术,将储能装置改为寿命长、功率特性好、可以实现大电流快速充放的超级电容,采用超级电容和交流电源同时对直流母线稳压系统供电的方式。该方式原理直观、硬件简单,并且切换时间为微秒级,大大提高了系统的效率和可靠性,适用于大功率、大负载的场合。

2 基于超级电容的直流母线稳压系统的分析与实现

直流母线稳压系统包括超级电容储能电路和 Buck-Boost 电路,采用电压电流双闭环控制的方式对变频器的直流母线电压、电流进行补偿,从而提高变频器的抗晃电性能,变频器直流母线稳压系统原理如图 4 所

示。图4中 U_{in} 为给定电压, V_{DC} 为变频器直流母线电压, i_{inv} 为变频器直流母线电流, G_v 和 G_i 分别为内环和外环比例-积分(proportional-integral, PI)控制器的传递函数。

2.1 超级电容的选择

超级电容作为储能元件,其作用是通过储存和释放能量来减小直流母线的能量波动。超级电容的选型是根据变频器直流母线正常工作电压范围 $U_{min} \sim U_{max}$ 、变频器额定功率 P 和所需支撑时间 T 来决定的。超级电容的容量 C_F 为:

$$C_F = \frac{2P \times T}{U_{max}^2 - U_{min}^2}, \quad (1)$$

电容容量与支撑时间的关系曲线如图5所示。

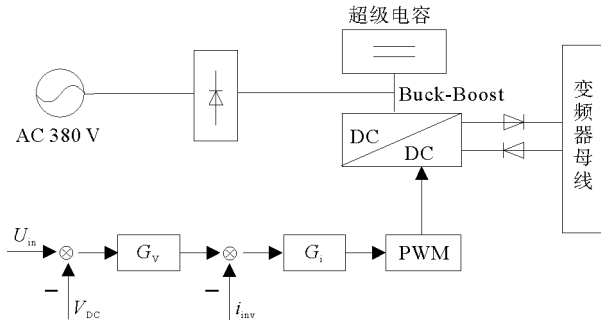


图4 稳压系统原理图

Fig. 4 Voltage regulator system schematic

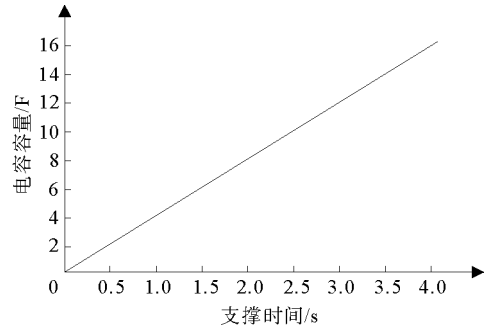


图5 电容容量与支撑时间的关系

Fig. 5 Relationship between capacitance capacity and support time

2.2 Buck-Boost 稳压电路的分析与设计

Buck-Boost 电路是直流升降压斩波电路,可以看作是将 Buck 电路和 Boost 电路串联并且合并开关形成的,根据流过电感的电流是否连续, Buck-Boost 电路将工作在连续导电模式(continuous conduction mode, CCM)或不连续导电模式(discontinuous conduction mode, DCM)^[17]。由于本研究中负载不会在空载和满载之间切换,因此只分析电路工作在连续导电模式下的元件参数,其拓扑结构如图6所示。图6中 U_i 为输入电压, U_o 为输出电压, L 为电感, D 为二极管, S 为脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)的功率开关器件, C 为输出滤波电容, R 为等效负载, i_L 为电感电流, i_R 为输出电流。

1) 电感和滤波电容参数确定

根据电感纹波电流 Δi_L , 电感值

$$L = \frac{U_i \times D \times T}{\Delta i_L}。$$

根据电荷守恒和电容纹波电压 ΔV , 滤波电容值

$$C = \frac{U_i \times D^2 \times T}{\Delta V \times R \times (1 - D)}。$$

式中: D 为二极管的占空比, R 为等效负载值。

2) 稳压控制器的设计

本研究采用电感电流为内环、变频器直流母线电压为外环的双闭环控制系统,如图7所示,图中 U_{in}^* 、 I_L^*

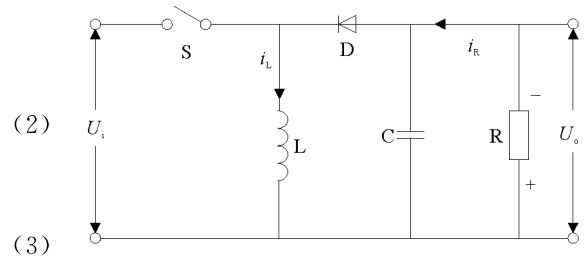


图6 Buck-Boost 拓扑结构

Fig. 6 Buck-Boost topology

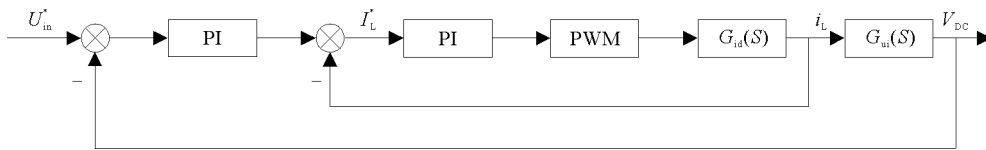


图7 双闭环控制系统框图

Fig. 7 Block diagram of double closed-loop control system

分别为变频器母线电压、电感电流的设定值。该系统为非线性系统,而建立传递函数需要系统具有线性、非时变的特点,故不能直接用于该系统。因此,先通过开关周期平均值将电路导通和关断两种状态联系起来,完成从时变到非时变的转化,再利用低频小信号扰动完成线性化,建立开关变换器在某一稳态工作点附近的交流小信号线性模型^[18]。

图 7 中 $G_{ui}(S)$ 和 $G_{id}(S)$ 的传递函数分别为:

$$G_{ui}(S) = -\frac{S \times i_L \times R - (1-D)(U_i + U_0) \times R}{S \times C \times R \times (U_i + U_0) + (1-D) \times i_L \times R + U_i + U_0}, \quad (4)$$

$$G_{id}(S) = \frac{S \times C \times R \times (U_i + U_0) + (1+D) \times R}{S^2 \times C \times L \times R - S \times L + (1-D)^2 \times R} \quad (5)$$

根据建立的传递函数模型,通过波特图进行矫正,图 8 为补偿前后电流内环与电压外环的波特图。

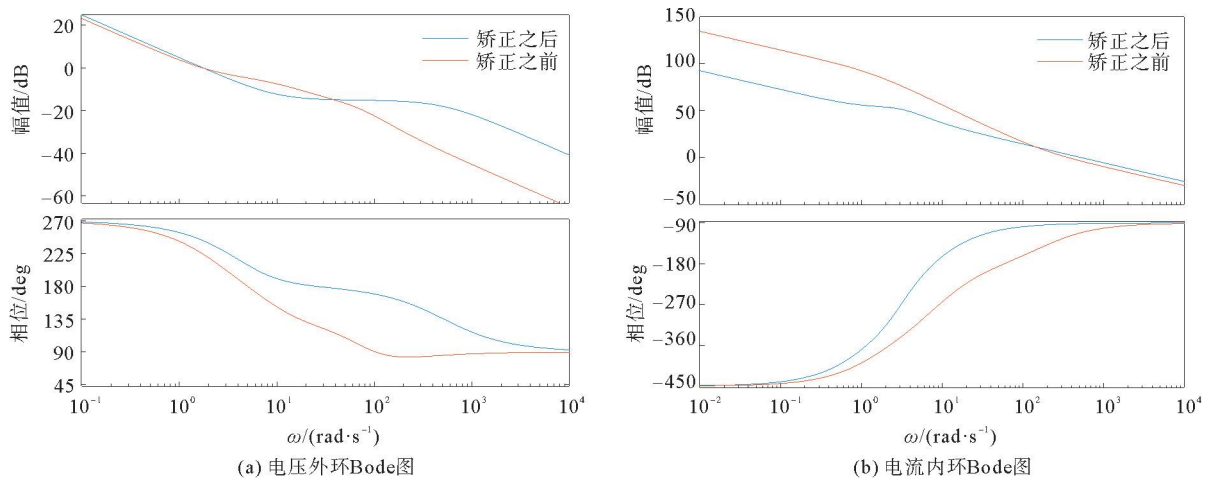


图 8 补偿前后电流内环与电压外环的波特图

Fig. 8 Bode plots of current inner loop and voltage outer loop before and after compensation

根据 Ziegler-Nichols 方法以及实际经验整定 PI 参数为电压外环 $K_p = 0.2$, $K_i = 1.9$, 电流内环 $K_p = 0.11$, $K_i = 0.1$ 。设计控制器时不可避免会有延迟,且延迟比较大时可能会造成控制器失稳。因此设计控制器时需要考虑延迟的影响。采用经典的史密斯(Smith)预估补偿算法,消除滞后部分对控制系统的影响,提高系统稳定性和动态性能。由于史密斯预估补偿算法的参数需要与被控对象保持严格一致才能达到良好的控制效果,该算法对本研究的非线性系统的优化作用有限。因此,在 Smith 预估补偿算法的基础上又引入了模糊控制算法来进一步提高控制器的性能^[19]。

根据模糊控制算法规则,将输入、输出分为 7 个模糊集: N_B (负大), N_M (负中), N_S (负小), Z_O (零), P_S (正小), P_M (正中), P_B (正大)。模糊控制器各个输入、输出变量作如下划定: e 、 e_c 、 ΔK_p 、 ΔK_i 的论域均为 $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$, 输入量 e 、 e_c 采用高斯型的隶属函数(gaussmf), 输出量 ΔK_p 、 ΔK_i 采用三角形隶属函数(trimf)。根据模型特性和实际经验,建立 e 、 e_c 、 ΔK_p 、 ΔK_i 的模糊语言规则如表 2 和表 3 所示。经过 Smith 预估补偿算法和模糊控制算法优化之后的模型如图 9 所示。

在图 9 所示的模型基础上,利用 Matlab 进行模型仿真,控制器输入一个初值为 0 的阶跃信号,由于系统为非最小相位系统,因此会存在一小段时间的负电压,但是实际运行中这种情况是不存在的。由图 10 可见,模型引入 Smith 预估补偿算法之后,减小了原模型的负调电压并且消除了超调电压,引入模糊控制算法后收敛速度提高了约 50%,进一步提高了模型的动态响应速度。本研究通过引入史密斯预估补偿算法和模糊控制算法,提高了系统的稳定性和动态响应速度,满足了稳压系统对于控制器的要求。

表 2 ΔK_p 模糊语言规则
Table 2 ΔK_p fuzzy language rules

e	e_c						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
-6	-6	-6	-4	-4	-2	0	0
-4	-6	-6	-4	-2	-2	0	0
-2	-6	-4	-2	-2	0	2	2
0	-4	-4	-2	0	2	4	4
2	-4	-2	0	2	2	4	6
4	0	0	2	2	4	6	6
6	0	0	2	4	4	6	6

表 3 ΔK_i 模糊语言规则
Table 3 ΔK_i fuzzy language rules

e	e_c						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
-6	-6	-6	-4	-4	-2	0	0
-4	-6	-6	-4	-2	-2	0	0
-2	-6	-4	-2	-2	0	2	2
0	-4	-4	-2	0	2	4	4
2	-4	-2	0	2	2	4	6
4	0	0	2	2	4	6	6
6	0	0	2	4	4	6	6

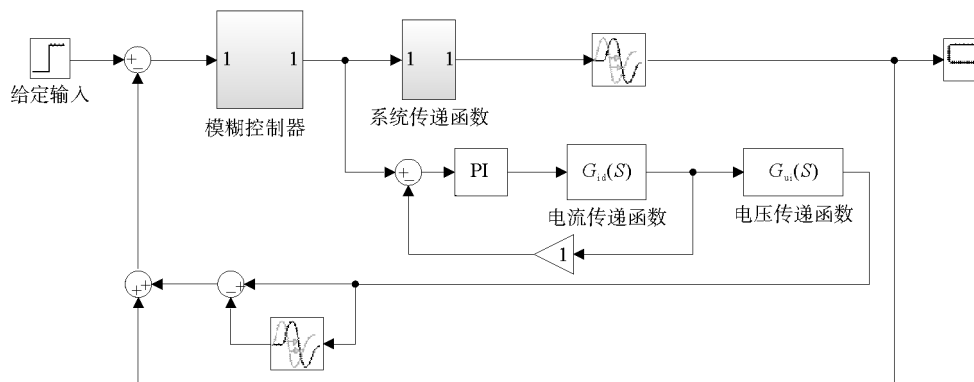


图 9 优化后的模型

Fig. 9 Optimized model

3 仿真与实验验证

3.1 基于超级电容的变频器电压暂降仿真验证与分析

在 Matlab/Simulink 平台上搭建仿真模型来验证变频器改进前后的效果,对变频器直流母线电压以及电动机输出转矩进行对比实验。在电源电压暂降为 20%、50% 和 100%,持续时间为 10 s 条件下,验证基于超级电容的变频器直流母线稳压技术的可行性与有效性,实验结果如图 11 所示。

由图 11 可知,未采用基于超级电容的变频器直流母线稳压技术时,电源电压的暂降会导致变频器直流母线的电压降低,从而触发变频器电压保护跳闸,此时电机转矩降为 0,电机停止运行。采用基于超级电容的变频器直流母线稳压技术后,在电源电压发生暂降 20%、50%、100% 时,变频器直流母线的电源电压与电源暂降之前保持一致,变频器可以保持正常运转,电机转矩也保持稳定。

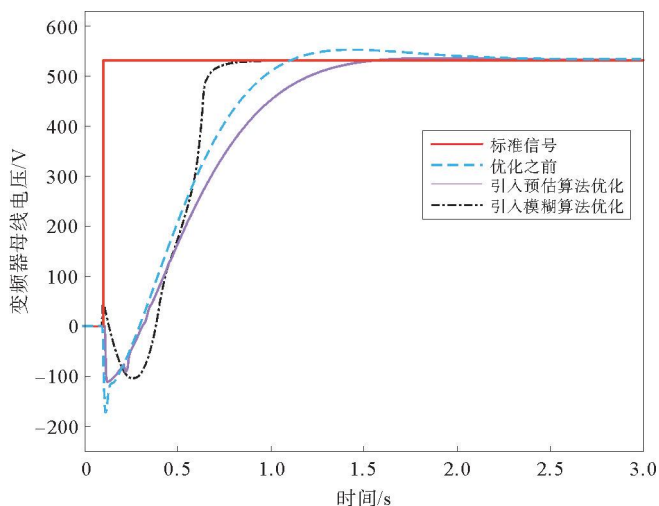


图 10 不同控制器在阶跃信号下的响应曲线

Fig. 10 Response curves of different controllers under step signals

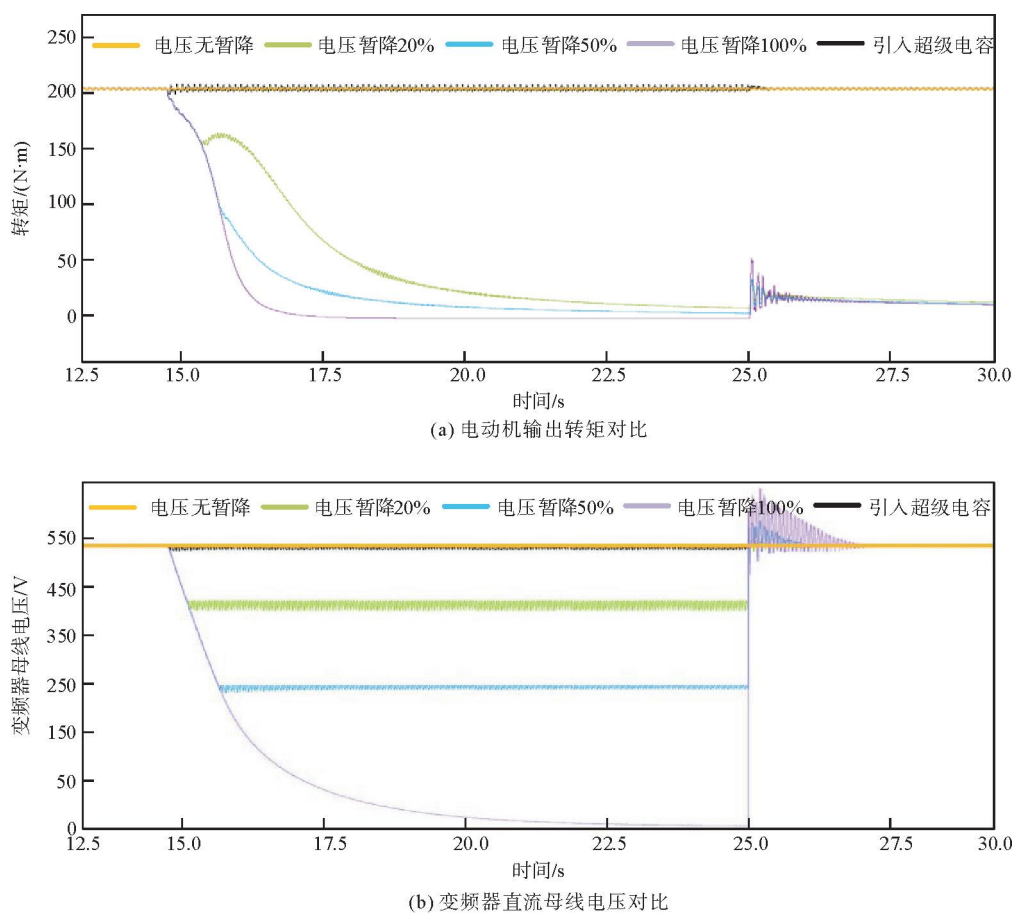


图 11 变频器电压暂降实验

Fig. 11 Voltage sag experiment of variable frequency converter

为进一步验证本研究方法在提高变频器电压暂降耐受能力中的优势,将文献[12]中基于快速开关的抗晃电技术和文献[14]中基于 UPS 的直流母线稳压技术与本方案进行对比,实验在电压暂降持续时间为 10 s、电源电压暂降幅度为 50% 的条件下进行,对比情况如图 12 所示,实验结果表明,基于快速开关的抗晃电技术在开关切换瞬间变频器电源电压会发生小幅度波动,导致电动机输出转矩波动;基于 UPS 的直流母线稳压技术在检测到变频器母线电压下降后,启动直流母线稳压系统来稳定变频器母线电压。由于 UPS 的瞬间放电能力差,因此在负载较大时会造成直流母线电压波动较大,电动机输出转矩不稳。相较于以上两种方案,本研究采用的基于超级电容的变频器直流母线稳压技术具有响应时间短、带载能力强的优势。

3.2 基于超级电容的变频器电压暂降耐受特性曲线

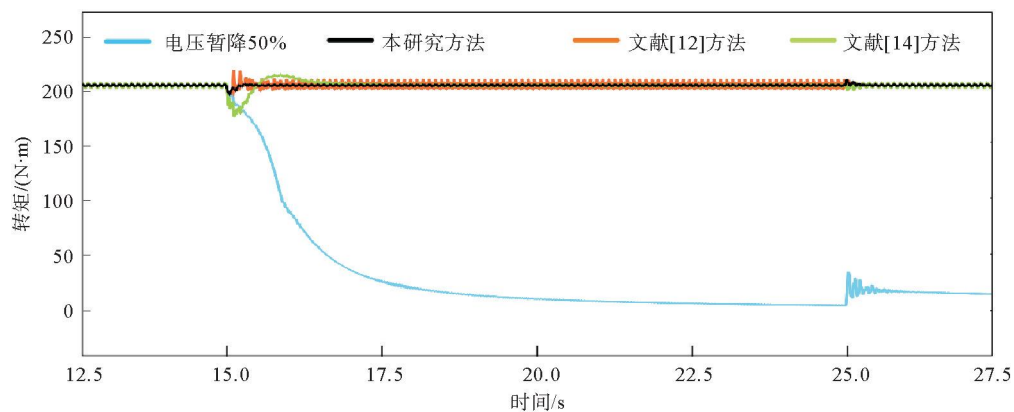
根据 IEEE 1668—2014 标准定义^[20],电压暂降耐受曲线是发生电压暂降时设备介于正常工作状态和故障状态的分界线。当电压暂降时间小于临界时间或电压暂降时间大于临界时间但电压暂降深度不大时,变频器在正常工作区域,其余区域则为故障区域。

为更好地衡量改进之后变频器的性能,本研究通过多次实验,获得如图 13 所示的变频器电压暂降耐受特性曲线。根据仿真模型的电压幅值和电压暂降持续时间绘制新的变频器电压暂降耐受曲线,并与国际标准变频器电压暂降耐受曲线进行对比可见,在采取基于超级电容的直流母线稳压技术后,变频器的电压暂降耐受能力大大提高,达到实验预期目的。

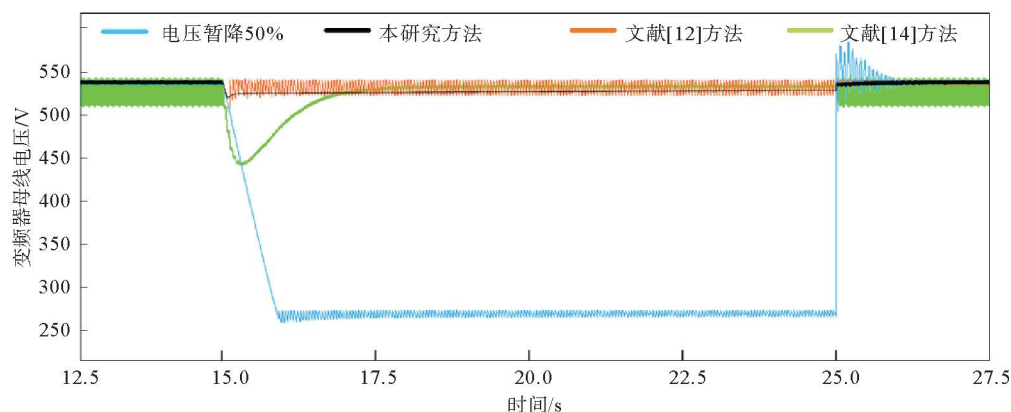
3.3 实验验证与分析

为进一步验证本研究技术的功能,搭建如图 14 所示测试平台。测试平台设备参数为:变频器型号 ABB ACS880-04-585A-3 250 kW,电动机型号 ABB M3BP315MLA4B3 200 kW,高压煤浆泵型号 GE FELUWA

Pumpen TGK 300/250-K180-DS100HD 167 kW; 测试验证流程为: 变频器启动, 电动机功率提升至额定功率的 70%, 此时高压煤浆泵满载运行, 待系统运行稳定后断开变频器前侧断路器, 观察变频器运行参数、直流母线电压等数据。



(a) 电动机输出转矩对比



(b) 变频器直流母线电压对比

图 12 电压暂降对比实验

Fig. 12 Voltage sag comparison experiments

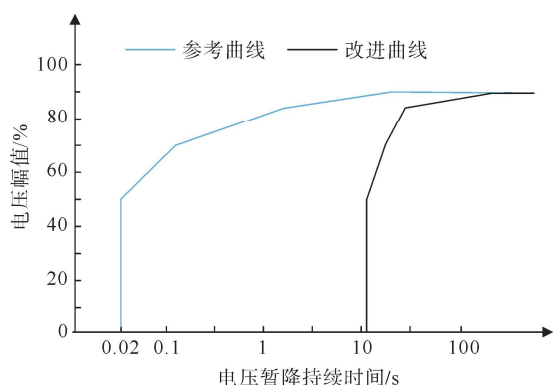


图 13 采用本研究技术后电压暂降耐受曲线对比图

Fig. 13 Comparison of voltage drop withstand curves after adopting the proposed technology

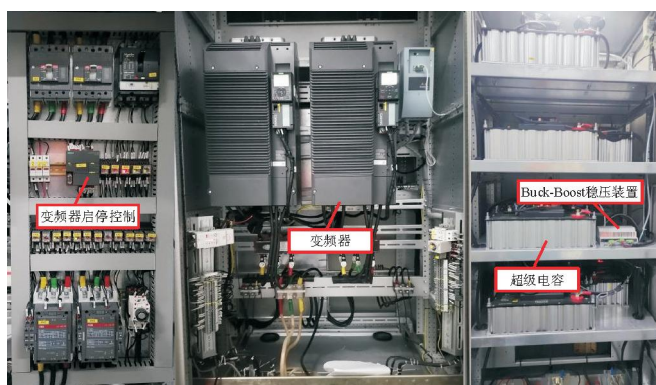


图 14 变频器电压暂降耐受能力试验平台

Fig. 14 Inverter voltage transient droop withstand capability test bench

在不同电压暂降幅度下多次拉合断路器, 变频器运行结果如表 4 所示。实验结果表明, 变频器运行中 Buck-Boost 稳压装置可自由投退, 对变频器无影响。变频器停止运行后 Buck-Boost 稳压装置自动退出。

表 4 试验结果

Table 4 Experimental results

电压暂降幅度/%	电压暂降时长/s	变频器母线电压/V	变频器工作状态
20	1.41	528~530	正常工作
	3.84	528~532	正常工作
	5.51	528~530	正常工作
	8.51	528~531	正常工作
	12.56	529~533	正常工作
50	1.41	528~530	正常工作
	3.84	528~532	正常工作
	5.51	528~530	正常工作
	8.51	528~531	正常工作
	12.56	529~533	停止工作
100	1.41	528~530	正常工作
	3.84	528~532	正常工作
	5.51	528~530	正常工作
	8.51	528~531	正常工作
	12.56	529~533	停止工作

4 结论

本研究对实际运行中的电力系统因电压波动影响高压煤浆泵变频器问题进行了分析,提出采用超级电容作为后备支撑,将史密斯预估补偿算法与模糊控制算法相结合,应用于 Buck-Boost 变换器的电压和电流双闭环稳压控制。史密斯预估算法可准确预测电压和电流的变化趋势,为控制系统提供重要参考信息。模糊控制算法基于模糊逻辑原理,根据当前预估值智能调节 Buck-Boost 变换器的参数,实现了变频器直流母线电压的稳定。通过仿真和实验验证,该技术以低成本有效地解决了电压暂降影响变频器平稳运行的问题,保证了煤气化装置的长期平稳运行。

参考文献:

[1] 徐永海,李晨懿,汪坤,等. 低压变频器对电网电压暂降耐受特性及兼容性研究[J]. 电工技术学报,2019,34(10):2216-2229.
XU Yonghai,LI Chenyi,WANG Kun,et al. Compatibility between low voltage variable-frequency drives and voltage sags in distribution systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(10):2216-2229.

[2] SHIN J W,YOUN Y W,KIM J S. Voltage sag mitigation effect considering failure probability according to the types of SF-CL[J/OL]. Energies,2023,16(2). DOI:10.3390/en16020625.

[3] JAGANNATH P,NITAI P,CHANDRA H M,et al. A novel approach of voltage sag data analysis stochastically:Study, representation,and detection of region of vulnerability[J/OL]. Sustainability,2023,15(5). DOI:/10.3390/su15054345.

[4] 赵坤,张勇,孙增平,等. 基于超级电容储能的暂态电压主动防御装置在解决化工企业晃电中的应用[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(6):96-101.
ZHAO Kun,ZHANG Yong,SUN Zengping,et al. Application of transient voltage active adjustment voltage system based on ultra-capacitor charge in solving power shaking of chemical enterprise[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2020,41(6):96-101.

[5] 胡安平,陶以彬,陈嘉源,等. 电压暂降治理措施及设备综述[J]. 电力电子技术,2019,53(7):1-5.
HU Anping,TAO Yibin,CHEN Jiayuan,et al. Review of voltage sag mitigation measures and equipments[J]. Power Electronics,2019,53(7):1-5.

[6] 贾频辉,齐林海,王红. 基于数据驱动和流式计算的电压暂降传播特性研究[J]. 电力信息与通信技术,2021,19(6):22-31.

- JIA Jiehui, QI Linhai, WANG Hong. Research on propagation characteristics of voltage sag based on data driven and stream computing[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(6): 22-31.
- [7] 陶顺, 唐松浩, 陈聪, 等. 变频调速器电压暂降耐受特性试验及量化方法研究 I: 机理分析与试验方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1273-1281.
- TAO Shun, TANG Songhao, CHEN Cong, et al. Experimental research on adjustable speed drivers tolerance to voltage sags and quantitative method Part I: Mechanism analysis and test method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1273-1281.
- [8] 唐松浩, 陶顺, 刘颖英, 等. 变频调速器电压暂降耐受特性试验及量化方法研究 II: 试验及量化方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2207-2215.
- TANG Songhao, TAO Shun, LIU Yingying, et al. Experimental research on adjustable speed drivers tolerance to voltage sags and quantitative method Part II: Experiment and quantification method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 2207-2215.
- [9] 何英杰, 支文浩, 张义坤, 等. 典型敏感设备电压暂降耐受能力自动测试系统研究[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1956-1964.
- HE Yingjie, ZHI Wenhao, ZHANG Yikun, et al. Research on automatic test system for voltage sag tolerance of typical sensitive equipment[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1956-1964.
- [10] 李晨钰, 汪坤, 卢文清, 等. 变频器对不同电压暂降的耐受特性研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(15): 1-7.
- LI Chenyi, WANG Kun, LU Wenqing, et al. Study on tolerance characteristics of variable-frequency drives under different types of voltage sags[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(15): 1-7.
- [11] 吴建宇, 李冰, 甘露, 等. 基于 Boost 升压的变频器低电压穿越应用[J]. 电力电子技术, 2021, 55(3): 74-76.
- WU Jianyu, LI Bing, GAN Lu, et al. Application of voltage ride through of inverter based on boost[J]. Power Electronics, 2021, 55(3): 74-76.
- [12] 万新新, 王鼎. 基于快速开关的抗晃电技术应用[J]. 电力安全技术, 2022, 24(4): 19-23.
- WAN Xinxin, WANG Ding. Application of electricity anti-interference technology based on fast switching[J]. Electric Safety Technology, 2022, 24(4): 19-23.
- [13] TAREEN W U, MEKHILEF S. Transformer-less 3P3W SAPF(three-phase three-wire shunt active power filter) with line-interactive UPS(uninterruptible power supply) and battery energy storage stage[J]. Energy, 2016, 109: 525-536.
- [14] 李志鹏, 孙俊德, 李龙刚, 等. 电压暂降对航天发射任务的影响及治理方案[J]. 载人航天, 2020, 26(3): 338-344.
- LI Zhipeng, SUN Junde, LI Longgang, et al. Effects of voltage sag on critical electric equipment in space launching site and its countermeasures[J]. Manned Spaceflight, 2020, 26(3): 338-344.
- [15] 朱明星, 卢轩, 张华赢, 等. 无储能动态电压恢复器安全运行区域[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 157-164.
- ZHU Mingxing, LU Xuan, ZHANG Huaying, et al. Safe operation area of energy-storage-free dynamic voltage restorer[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 157-164.
- [16] LIU X, WANG S, SONG X, et al. Stability control strategies for bidirectional energy storage converters considering AC constant power loads[J/OL]. Electronics, 2023, 12(4). DOI: 10.3390/electronics12041067.
- [17] 祁静静, 吴学智, 王久和, 等. 采用开关电感的 Buck 变换器 CCM 和 DCM 特性分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(16): 4155-4168.
- QI Jingjing, WU Xuezhi, WANG Jiuhe, et al. Characteristics analysis of buck converter with switched inductor in CCM and DCM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(16): 4155-4168.
- [18] 马智远, 栾乐, 许中, 等. 一种基于超级电容的变频器电压暂降治理装置[J]. 电力电子技术, 2020, 54(12): 60-63.
- MA Zhiyuan, LUAN Le, XU Zhong, et al. A voltage sag mitigation device for adjustable speed drives based on super capacitor[J]. Power Electronics, 2020, 54(12): 60-63.
- [19] MANSOURI A, KRIM F, LAIB A. Implementation and design of fuzzy controller for high performance buck-boost and flyback converters[C]//2020 6th IEEE International Energy Conference(ENERGYCon). IEEE, 2020. DOI: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236496.
- [20] IEEE Standard Association. IEEE trial-use recommended practice for voltage sag and short interruption ride-through testing for end-use electrical equipment rated less than 1000V; STD P1668—2014[S]. New York: IEEE, 2014.

(责任编辑: 齐敏华)