

火电辅机变频器低压穿越直流电压补偿及其控制^{*}

邬海涣¹, 孟思思², 赖锦木³, 陈碧琰¹, 黄致远¹

(1. 国网浙江省电力有限公司宁波供电公司, 浙江 宁波 315000;

2. 宁波市海曙区经济与信息化局, 浙江 宁波 315000;

3. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对火电辅机变频器因厂用电压跌落而触发闭锁, 造成发电机组停机的问题, 设计了基于变频器直流母线电压补偿的辅助穿越装置。辅机变频器采用直接转矩控制, 低压穿越装置主电路采用三重交错并联升压变换器结构, 在电压跌落期间维持变频器直流母线电压稳定, 同时减小输出电流高频纹波。考虑到并联模块参数差异造成的均流问题, 提出在传统电压电流双闭环控制的电压外环加入均流环的解决方法, 消除环流, 使开关管电流应力更为均衡。由于控制系统具有非线性、强耦合的特点, 传统 PI 控制器存在局限性, 所以利用模糊控制算法优化 PI 控制器参数整定, 改善其性能。最后用仿真验证了所提方法的有效性。

关键词: 火电辅机变频器; 低压穿越; 直流电压补偿; 均流; 模糊控制

中图分类号: TM 621 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)03-0115-06

DC Voltage Compensation and Control of Low Voltage Ride Through Device of Power Auxiliary Inverter^{*}

WU Haihuan¹, MENG Sisi², LAI Jinmu³, CHEN Biyan¹, HUANG Zhiyuan¹

(1. Ningbo Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Ningbo 315000, China;

2. Committee of Economic and Information Technology of Haishu District, Ningbo 315000, China;

3. State Key Laboratory of Strong Electromagnetic Engineering and New Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In view of the problem that power generating unit will shut down due to the drop of the station-service voltage, low voltage ride through (LVRT) device based on the inverter DC bus voltage compensation was designed. For the auxiliary inverter, direct torque control was adopted. For the main circuit of the LVRT device, ternary staggered parallel boost converter structure was used, which maintained the DC bus voltage stability during the voltage drop and reduced the high frequency ripple of the output current. Considering the current balancing problem of the parallel modules caused by parameter difference, current balancing loop was added to the outer loop of the traditional voltage and current double-closed-loop control, so that the circulating current was eliminated and the current stress of switch devices was more balanced. Because of the nonlinear and strong coupling characteristics of the control system, conventional PI controller was limited, so fuzzy control algorithm was used to optimize the parameters of PI controller. Finally, simulation was carried out to prove the proposed method.

Key words: power auxiliary inverter; low voltage ride through; DC voltage compensation; current balancing; fuzzy control

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902900)

作者简介: 邬海涣(1990—),男,硕士,工程师,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

孟思思(1992—),女,硕士,研究方向为电力经济与信息化。

赖锦木(1990—),男,博士研究生,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

0 引言

为提高火电厂运行的经济效益和安全稳定性,近年来发电机组辅机广泛采用变频控制技术^[1-2]。但是通用辅机变频器一旦遇到外部电源电压突降的情况,往往采取闭锁输出的策略,导致机组停炉,影响电网安全稳定。一类辅机如送风机、给煤机等一旦失电时间超过 5 s,即有可能造成设备损坏、功率损失甚至机组停机。

火电辅机变频器低压穿越(LVRT)问题关乎电网安全稳定。如何使火电机组具备风电机组的不间断并网运行能力成为学者的研究热点。文献[3-5]提出改造辅机变频器自身功能的方案,在变频器内部整流和逆变环节间插入 Boost 升压电路。该方案不但受现有变频器结构制约,还会增加变频器自身成本。文献[6-7]提出通过对火电锅炉炉膛安全监控系统(FSSS)逻辑延时来躲过电压跌落的方案。考虑事故响应速度,方案可采用的延时长度受限,且并未从根本上解决低电压问题,随意修改 FSSS 跳闸信号出口时间又违反火电安全规程,降低了系统安全等级。文献[8-10]提出交流电源侧补偿的方法,在电源侧串联动态电压调节器(DVR)或不间断电源(UPS),电压跌落期间 DVR 和 UPS 可作为等效支撑电源,使变频器外电源电压保持稳定。然而,在线式 UPS 容量小且成本高,难以大范围推广;DVR 补偿深度不足,应用受限。文献[10-11]提出利用蓄电池补偿变频器直流母线电压的方法。平时蓄电池处于浮充状态,一旦电压跌落,蓄电池可快速释放能量来支撑变频器电压。但是蓄电池对运行环境要求较高,维护成本昂贵,性价比低。文献[12-14]给出了利用不控整流单元结合 Boost 升压电路的直流母线电压补偿方法,该方法易于实现且经济性好。但文献[12]采用单重升压电路,输出电流脉动较大;文献[13-14]未考虑多重电路的并联模块均流问题,且文献[14]采用传统 PI 控制器,参数整定困难。

本文采用文献[12-14]所提的方案,在辅机变频器整流和逆变单元间并联三重交错 Boost 升压电路,补偿直流母线电压。首先建立辅机变频器直接转矩控制(DTC)模型。为了使升压装置各模块电流保持均匀,在传统双闭环控制的电压外

环加入均流环节,减小了并联单元之间的电流差异。考虑到控制对象复杂且无特定传递函数,传统 PI 控制器参数整定困难,采用模糊算法优化电压外环 PI 控制器参数,有效改善了直流电压补偿装置投切的动态和稳态性能。

1 辅机变频器控制系统

本文辅机变频器采用 DTC。DTC 具有结构简单、鲁棒性好、响应速度快且无需复杂坐标变换等特点,是一种高性能的火电辅机变频调速控制方法。

根据感应电机数学模型,空间矢量电压方程和转矩方程在 $\alpha\text{-}\beta$ 坐标系下可表示为

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + p \Psi_s \\ T_{em} = P_n (i_{s\beta} \Psi_{s\alpha} - i_{s\alpha} \Psi_{s\beta}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_s 、 i_s 、 Ψ_s ——定子电压、定子电流和定子磁链空间矢量;

R_s ——定子电阻;

p ——微分算子;

T_{em} ——电磁转矩;

P_n ——电机额定功率。

忽略定子电阻,对电压方程离散和变形处理,并改写转矩方程,可得:

$$\begin{cases} \Psi_s(t_2) = \Psi_s(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} u_s dt \\ T_{em} = K \Psi_s \otimes \Psi_r = K \Psi_s \Psi_r \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ ——磁通角;

K ——待定常数。

由式(2)可见,定子磁链取决于定子电压矢量,在保持磁链不变的情况下,可通过控制磁通角 θ 来控制电机转矩。

图 1 所示为采用 DTC 的火电辅机变频器。厂用电经三相不控整流电路转为直流,经逆变器接入风机、水泵等辅机电机(IM)。其中直流

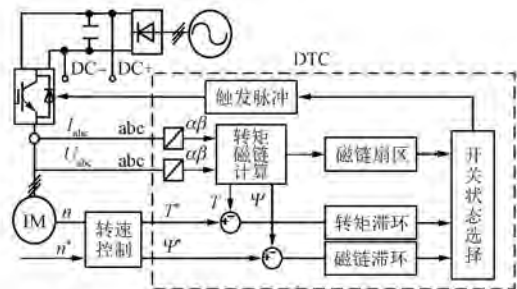


图 1 变频器及 DTC 系统

母线引出 DC+ 和 DC- 端子,用于连接电压补偿装置。电机转速给定值 n^* 和测量值 n 经转速控制模块计算后,可得转矩指令值 T^* 和磁链指令值 Ψ^* , T^* 和 Ψ^* 送入虚线框所示 DTC 系统。电机三相电压 U_{abc} 和电流 I_{abc} 作为 DTC 系统的另一路输入,先经 $abc/\alpha\beta$ 变换为 $\alpha\beta$ 平面电气量,再经计算得到转矩和磁链的观测值。滞环比较器用于调节指令值和观测值的误差,输出控制指令。该指令是开关状态选择表确定输出电压矢量的依据。最后,脉冲触发模块将电压矢量转换为逆变器开关管的门极驱动信号,从而控制感应电机运行。

2 补偿装置主电路拓扑

图 2 所示为低压穿越装置采用不控整流+三重交错并联 Boost 电路的拓扑结构。三相电源经二极管不控整流电路转换为直流,存储于电容 C_1 。电容 C_1 两侧电压经 Boost 电路升压斩波后,馈入变频器直流母线端子 DC+ 与 DC-。接触器 K2 用于控制电压补偿装置的投切。

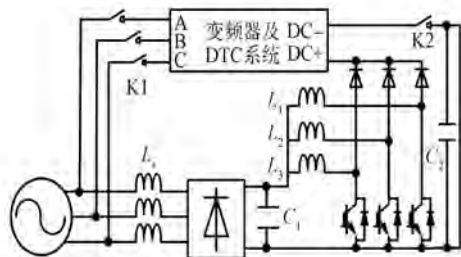


图 2 低压穿越补偿装置拓扑

升压模块采用三重交错并联结构,该结构由 3 个 Boost 单元并联而成。每个周期各单元内开关器件导通顺序间隔 120° ,输出总电流为各单元电流之和。由于各单元电流的纹波交错抵消,负载电流的纹波可大幅减小。相对于单重 Boost 结构,三重交错并联可有效减小滤波电感的体积和重量。

正常工作时,辅机变频器主电源为三相厂用电,低压穿越装置处于待机状态。一旦检测到电源电压跌落,低压穿越装置自动投入,作为主电源支撑变频器直流母线电压,使其在整个跌落期间保持稳定。待厂用电压恢复后,低压穿越装置自动切换回待机状态。

3 低压穿越装置控制策略

3.1 装置投切控制策略

外部电压跌落可触发补偿装置投入。补偿装置采集不控整流单元直流侧电压,利用低通滤波算法处理电压采样点,消除其中的高频分量,提取稳定值 u_{c1} 。不控整流输出电压 u_{c1} 可反映外部电源情况。假设相邻两个输出值分别为 $u_{c1,l1}$ 和 $u_{c1,l2}$,低压跌落阈值为 u_c 。若满足式(3)关系,则判定为电源电压跌落,补偿装置由待机状态切换为投入,合上接触器 K1,通过升压斩波支撑变频器直流母线电压:

$$u_{c1,l1} \geq u_c \ \& \ u_{c1,l2} < u_c \quad (3)$$

反之,若满足式(4)关系,则判定为电源电压恢复正常,补偿装置转为待机状态,封锁开关管触发脉冲,断开接触器 K2:

$$u_{c1,l1} \leq u_c \ \& \ u_{c1,l2} > u_c \quad (4)$$

除以上两种情况外,投切信号有自保持功能,不因外界干扰或抖动而改变。

3.2 电压外环加均流控制策略

构建如图 3 所示的低压穿越控制策略。为了使升压电路的输出电压跟踪变频器直流母线电压设定值 u_{ref} ,电容 C_2 电压 u_{c2} 经低通滤波器(LPF)后与 u_{ref} 构成电压外环,电压误差信号输入模糊 PI 控制器进行调理。电流环是反馈控制的内环,首先对采集的各电感电流值 i_{L1} 、 i_{L2} 和 i_{L3} 求和,并将总电流加入反馈回路,在 PI 控制器的调理下使其跟踪电压外环输出的指令值。电流环输出值与电容 C_1 两端电压 u_{c1} 叠加,得到期望的控制指令值 u_{con} 。该指令值通过式(5)计算,转化为期望占空比 d :

$$d = 1 - \frac{u_{con}}{u_{ref}} \quad (5)$$

最终,占空比 d 经三角载波调制得到脉宽调制(PWM)信号,驱动开关管输出设定电压。

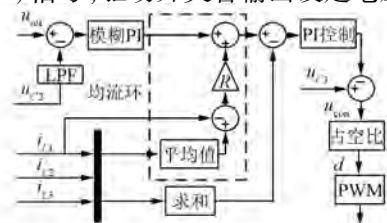


图 3 低压穿越装置电压补偿控制策略

由于制造工艺限制,实际装置中各并联模块的元件参数很难做到完全一致,所以误差在所难免。若将各 Boost 模块直接并联,难以保证负载电流均匀分布于各模块中。本文采用在电压外环加入均流环的改进控制策略。各模块电感电流的平均值和任一模块电感电流值之差构成均流误差,该差值经均流调节器放大,加入到电压环正相端。为了简化均流系统设计,调节器采用比例环节,比例增益大小用 R 表示。增益越大均流效果越明显,但 R 取值过大将导致控制系统不稳定,应使 R 小于稳定临界值。均流环指令取电感电流平均值,使每个模块的电感电流跟踪平均值并与其保持一致。若存在均流误差,则该误差经放大后与电压环指令信号之和作为电流环的指令,共同参与电流调节。电压环与均流环共同作为外环,辅以动态响应速度较快的电流内环的结构,可以使整个控制系统的均流动态性能得到改善。

3.3 模糊自适应 PI 控制

本文电压补偿装置的控制对象为 DTC 变频调速系统,具有强耦合和非线性的特点,PI 参数整定困难。同时,由于装置投切工况变化和受外界因素干扰,受控对象的特性参数和结构发生变化,传统 PI 控制器参数整定方法基于对象特性,存在局限性。本文采用模糊自适应控制^[15],利用模糊算法修正电压外环 PI 控制器参数,使其随着系统变化而自动调整,以提高被控对象的性能。

模糊 PI 控制器结构如图 4 所示。指令电压 u_{ref} 与负载电压 u_{c2} 的误差为 e ; e 经微分算子 de/dt 计算得到误差变化率 ec 。模糊算法模块以 e 及 ec 作为输入,利用模糊控制规则开展推理计算,输出比例参数的修正量 Δk_p 与积分参数的修正量 Δk_i 。然后利用式(6)对 PI 控制器参数进行修正,实现 k_p 和 k_i 的实时优化:

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i \end{cases} \quad (6)$$

其中 k_{p0} 和 k_{i0} 分别为上一采样时刻的 PI 参数。修

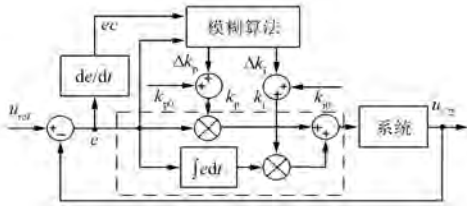


图 4 模糊自适应 PI 控制器结构

正后的 k_p 和 k_i 重新构成如图 4 虚线框所示的 PI 控制器,对外环电压误差进行调整控制。

图 5 所示为模糊算法的内部结构。模糊规则表作为算法知识库,是 PI 参数调整推理的依据。本文采用如表 1 和表 2 所示规则表作为比例和积分参数自整定的原则,其中 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB} 表示输入和输出量的模糊子集。电压误差 e 与误差变化率 ec 经过模糊化处理,将精确值转为模糊量,形成各自的模糊子集。模糊推导环节依照规则表查询各输入模糊量对应的输出模糊子集。推理输出的模糊子集经过解模糊环节,将模糊量还原为精确值,最终输出 PI 参数的调整量。隶属函数用来描述模糊化和解模糊环节中精确值和模糊子集的映射可能性程度,输入量 e 与 ec 服从高斯隶属函数,输出量 Δk_p 与 Δk_i 服从三角隶属函数,解模糊环节采用重心法。

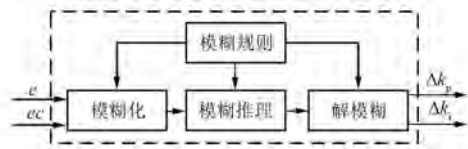


图 5 模糊算法结构

表 1 Δk_p 模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 Δk_i 模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

4 仿真分析

为了验证所提低压穿越装置的功能及电压补偿控制策略的正确性,搭建 MATLAB/Simulink 仿真模型进行研究。补偿装置额定功率为 20 kW,电源侧电感 L_s 为 0.1 mH,不控整流滤波电容 C_1 为 1 000 μF ,各 Boost 电路升压电感 L_2 为 2 mH,输出稳压电容 C_2 为 1 500 μF 。交错并联结构降低了控制系统对开关频率的要求,开关频率可适当降低,取 5 kHz。装置输出端并联于辅机变频器直流母线。变频器采用直接转矩控制,感应电机容量取 15 kW,额定转速 1 000 r/min,直流母线电容为 1 000 μF ,直流母线电压额定值为 520 V。仿真过程中厂用电源低压穿越时间为 0.6 s。

如图 6 所示为补偿装置对辅机变频器电压的支撑作用。电机零时刻开始起动,转速 n 开始平稳上升。0.2 s 时电机加额定负载 30 N·m,电磁转矩 T_e 和定子电流 i_{sa} 也相应变大。0.57 s 时电机达到额定转速 1 000 r/min,起动完成后定子电流幅值下降,此时电磁转矩回落并与负载转矩平衡,电机保持稳定运行。0.7 s 时厂用电压幅值突然跌落,跌落时间持续 0.6 s。补偿装置立刻由待机切换为运行状态,电压跌落期间辅机电机转速、定子电流和电磁转矩均保持不变,变频器稳定运行。可见补偿装置可有效消除低电压对辅机运行的影响。

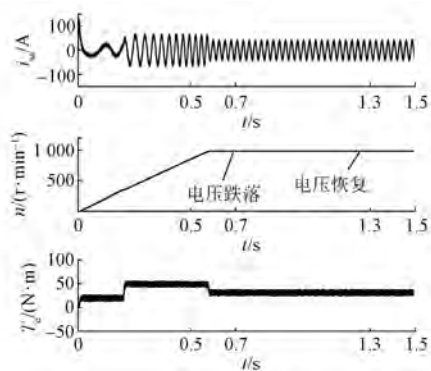


图 6 电压跌落后期辅机运行情况

图 7 所示为电压跌落期间补偿装置输入侧和输出侧电压的变化情况。0.7 s 时外部电源电压 u_a 突然跌落,导致不控整流电路输出的直流电压 u_{c1} 相应变小。补偿装置一旦检测到电压幅值变化,立刻由待机切换为运行,利用三重 Boost 电路

升压,维持输出侧(变频器直流母线)电压 u_{c2} 稳定,直至外部电压恢复。

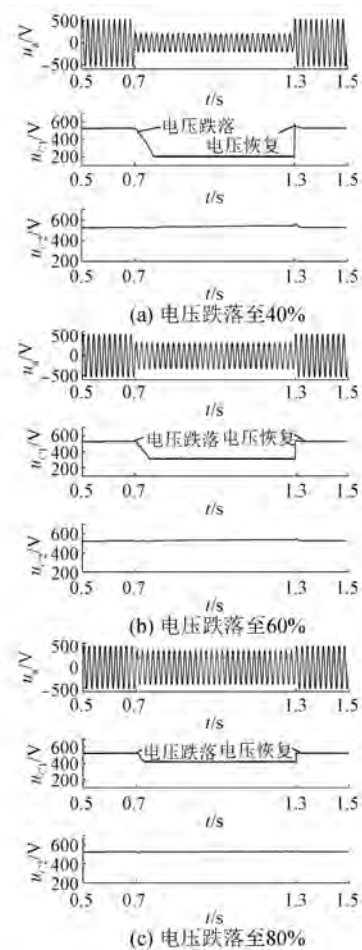


图 7 不同电压跌落程度下的直流补偿效果

由图 7 可见,电压跌落期间辅机直流电压始终保持平稳,即使在 40% 的跌落程度下波动也很小,且装置投入和退出切换流畅,投切瞬间无冲击。

为了测试均流环的作用,将三重 Boost 电路的电感 L_1 增大为 3 mH,其余电感大小不变,仿真各电感电流如图 8 所示。不加均流环时,低压穿越期间电感 L_1 电流 i_{L1} 分布于 -5~5 A 区间,平均值约为零,而电感 L_2 电流 i_{L2} 、 L_3 电流 i_{L3} 则分布于 0~10 A 区间,平均值约为 5 A,可见负载电流分布不均衡。加均流环后,均流环发挥调节作用,使各电感电流的分布均趋向于 0~10 A 区间,平均值均保持在约 5 A,消除了电感 L_1 参数变化造成的影响,各模块负载电流差异变小。

将电压外环传统 PI 控制与模糊 PI 控制仿真

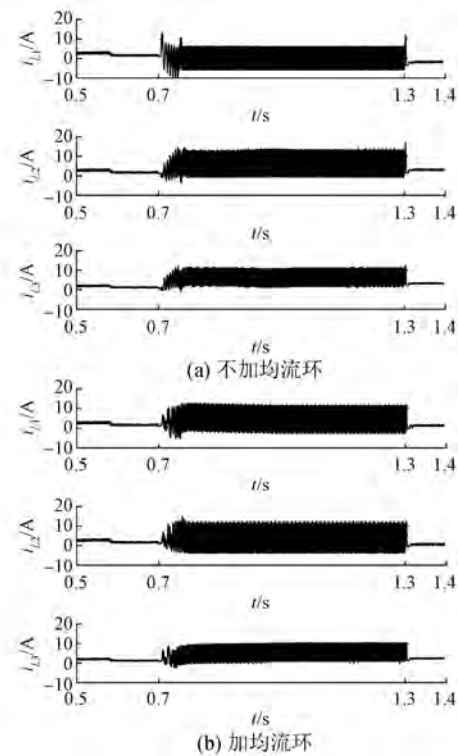


图 8 各 Boost 电路的电感电流

对比,观察变频器直流母线电压 u_{c2} ,如图 9 所示。模糊 PI 控制器参数有自适应调节的特性,将其初始值设为 $k_{p0}=1.2, k_{i0}=0.8$ 。传统 PI 控制器参数为固定值,设 $k_p=1.2, k_i=0.8$ 。0.4~0.57 s 期间,电机处于起动阶段。0.57 s 时电机起动完成,定子电流下降,直流母线电压小幅升高并保持 525 V。0.7 s 时电压跌落瞬间,模糊 PI 控制直流母线电压维持不变,而传统 PI 控制直流母线电压较跌落前下降约 10 V,0.1 s 后缓慢回升。0.9 s 时,模糊 PI 和传统 PI 控制输出电压均略高于额定值,但模糊 PI 误差相对较小。1.3 s 时厂用电恢复,装置退出瞬间模糊 PI 的电压冲击也小于传统 PI 控制。可见,模糊 PI 控制有更好的动态和稳态性能。

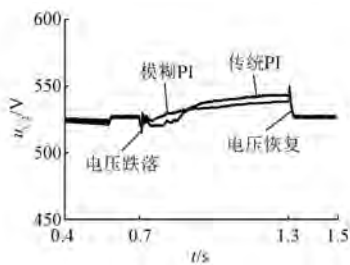


图 9 低压穿越过程变频器直流母线电压

5 结 语

本文以火电辅机低压穿越问题为研究对象,分析了变频器直流母线电压的补偿方案和相应的控制策略,得出如下结论:

(1) 利用交错并联 Boost 电路支撑变频器直流母线电压,可消除外部电源电压跌落对辅机电机运行的影响。

(2) 本文所提电压外环加均流环的双闭环控制策略可避免并联 Boost 电路模块参数不一致带来的电流不平衡问题,抑制环流。

(3) 相对于传统 PI 控制,模糊 PI 控制器的参数自适应调整特性可改善直流电压补偿时的动态和稳态性能。

【参考文献】

- [1] 谈曜.高压变频器在火电机组凝结水泵中的应用 [D].广州:华南理工大学,2013.
- [2] 彭发旺.高压变频器在 600 MW 火电机组输煤皮带机上的应用[J].变频器世界,2012(6): 93.
- [3] MARTIN P, JIRI F. Electric drive with voltage-fed inverter with regard to influence of voltage sag [C] // 16th International Conference on Mechatronics-Mechatronika 2014, 2014: 666.
- [4] MONTERO H O C, ENJETI P N. Ride-through for critical loads. Exploring a low-cost approach to maintaining continuous connections between buildings and/or industrial systems [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2002, 8(6): 45.
- [5] WANG X Y, ZHANG T, LIU S, et al. Ride-through for important auxiliary equipment drive inverter [C] // 2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2013.
- [6] 牛茂龙,白永军.国华准格尔发电厂给煤机跳闸的原因分析及改造[J].内蒙古电力技术,2004(5): 106.
- [7] 岳建华,毕春海,岳涛.火电厂给煤机低电压穿越探讨[J].中国电力,2014,47(2): 18.
- [8] 邵文权,王龙,王建波,等.火电厂给煤机变频器电压暂降抗扰力[J].电力建设,2015,36(3): 88.
- [9] MONTERO H O C, ENJETI P N. A fast detection algorithm suitable for mitigation of numerous power quality disturbances [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(6): 1684.

(下转第 126 页)

性。为了实现机组起动到额定转速,给出了在液体电阻达到低位转速稳定后,逐次投入固体金属电阻,在转速稳定后在电机转子侧短接的方案,计算了固体金属的各级阻值、稳定时间和稳定后的转速。通过 MATLAB/Simulink 仿真了起动及其后并入固体电阻及短接的过程。仿真结果与计算结果一致,验证了方案的可行性。建立的仿真模型可以作为研究不同参数、不同控制策略下的机组起动过程动态特性的重要工具。

下一步将分析机组起动过程中液体电阻温度变化对其阻值的影响,基于仿真软件建立尽可能精确的液体电阻等效模型,并与滑差装置控制优化后的实际波形进行对比验证。

【参考文献】

- [1] 王海兵,彭建飞,宣伟民,等.300 MVA 脉冲发电机定子铁心磁化试验[J].核聚变与等离子体物理,2016,36(4): 334.
- [2] WANG Y L, LIU P G, WANG Y Q, et al. Simulation of Ohmic heating power supply for HL-2M[C]//2013 19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC), 2013.
- [3] YAO L Y, LI W B, CHEN Y H, et al. Design of the HL-2M power supply control system [J]. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(9/10): 1505.
- [4] 宣伟民,姚列英,李华俊,等.HL-2A 装置供电系统[J].核聚变与等离子体物理,2005,25(4): 9.
- [5] KOZLOWSKI M. Wound rotor to induction motor and VFD conversion case study[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3): 1221.
- [6] 彭建飞,宣伟民,王海兵.HL-2A 装置大功率电动飞轮脉冲发电机组启动过程分析和建模[C]//中国核学会 2011 年学术年会,2011: 214.
- [7] HAMOUDA R M, ALLOLAH A I, BADR M A, et al. A comparative study on the starting methods of three phase wound-rotor induction motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14 (4): 918.
- [8] JAFARI H K, MONJO L, CÓRCOLES F, et al. Parameter estimation of wound-rotor induction motors from transient measurements [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(2): 300.
- [9] 黄传金,陈铁军,杨育霞,等.绕线式异步电动机启动特性无传感器测试新方法[J].微电机,2013,46(6): 46.
- [10] DAVIU J A, LÓPEZ A Q, ALARCON V C, et al. Reliable detection of rotor winding asymmetries in wound rotor induction motors via integral current analysis [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2040.
- [11] 张英,付艳,刘勇军.矿井提升机无触点开关启动方法探讨[J].煤矿机械,2013,34(6): 214.

收稿日期: 2018-10-18

(上接第 120 页)

- [10] 韩其国,陈林.防止变频器电压跌落停机的电源方案[J].电源技术,2012(11): 1735.
- [11] 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(3): 89.
- [12] KUS V, PITTERMANN M, FORT J. The electric drive with indirect frequency converter and asynchronous motors with improved immunity against the supply voltage dips [C] // 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 2014: 223.
- [13] 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.
- [14] 林志法,宋冬冬,杜海江,等.变频器低电压穿越电源的设计与实现[J].电工电能新技术,2017,36(12): 59.
- [15] 李谟发,彭晓,李永坚,等.基于模糊 PI 调节器的无刷双馈电机直接转矩控制[J].电机与控制应用,2012,39(10): 30.

收稿日期: 2018-10-16