

火电厂辅机变频器低电压穿越电源

王晓宇¹, 张涛², 刘树², 操丰梅², 刘志超², 杨奇逊^{1,2}

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;
2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 母线电压跌落会引起火电厂变频器低压保护动作, 导致火电厂辅机停转, 进而致使机组非计划停机。针对该问题, 设计了一种基于电力电子器件的无源变频器低电压穿越电源(ILP), 其主电路拓扑由基于三重并联交错 Boost 电路的直流变换电路、高可靠性的旁路通道和控制电源构成, 其中, 基于三重并联交错 Boost 的直流变换电路减小了 ILP 电感电流和电容电压的纹波。根据所设计的拓扑结构, 提出了电网电压跌落快速识别方法和装置多元化运行模式。针对装置现场控制参数整定困难、调试周期长的问题, 采用了以输出误差二次方为性能指标的单神经元自适应 PI 控制方法。电磁暂态仿真、现场试验与实际应用表明, 所设计的 ILP 具备良好的动、静态输出特性, 可以有效地提高变频器的低电压穿越能力。

关键词: 火电厂; 变频器; 低电压穿越; 电源; 电网电压跌落; 单神经元 PI; 神经网络

中图分类号: TM 621; TM 91

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.05.024

0 引言

近年来, 为最大限度地降低火电厂厂用电率和发电成本, 提高企业的市场竞争力, 火电厂对其辅机进行了变频调速改造^[1-3]。然而, 为变频器供电的母线电压常伴随有瞬间跌落或由于母线切换等情况造成母线电压瞬时失电。发生母线电压瞬时跌落或失电故障后, 变频器会即时停机。一旦火电厂一些关键的辅机设备由于变频器故障而非正常停机, 往往会导致机组负荷大幅下降甚至跳机、锅炉熄火等事故^[4-7]。

国内火电厂也屡次出现由于母线电压不稳定导致变频器低压保护跳闸, 造成辅机停机, 引起非计划停炉的事故。2011 年 1 月 2 日凌晨, 华能伊敏煤电有限公司发电厂 5053 开关 A 相电流互感器(TA)故障, 造成 500 kV 系统母线接地, A 相电压降至 16.8 kV (310 kV), 厂用 6 kV 母线电压下降至 3.9 kV, 给煤机变频器闭锁, 锅炉主燃料跳闸 MFT(Main Fuel Trip)动作, 4 号机组跳机; 神华内蒙古国华呼伦贝尔电厂受连续 2 次的单相接地故障冲击, 持续时间分别为 65.208 ms 和 515 ms, 间隔 632 ms, MFT 动作, 2 号机组跳机。究其原因, 主要有 2 个方面: 一方面, 厂供电系统故障, 造成变频器直流母线电压跌落; 另一方面, 变频器柜的控制电源电压跌落。

这种由于辅机变频器低压保护跳闸而引起的非计划停炉, 给电厂带来很大的经济损失, 也是目前电厂面临的比较大的问题, 迫切需要解决。文献[8-9]提出对大量无失压再起功能的变频器进行功能升级, 使其具备失压再起及低电压穿越的功能, 但增加这些功能需要变频器厂家对变频器软件及硬件

进行大幅改进、升级, 该方法在实际中可行性不大; 文献[10]提出电厂可通过炉膛安全监控系统 FSSS (Furnace Safety Supervisory System) 给粉机全停逻辑延时来处理这个问题, 但从前期调研了解到电厂在初期进行多台给煤机变频器同时失压重起实验时, 炉膛压力波动剧烈, 延时使得 FSSS 安全级别降低使用, 存在爆炉隐患, 这证明该方案的可行性不大; 文献[11]提出对变频器结构进行改进, 增加储能元件, 如为变频器增加不间断电源(UPS)或在变频器直流母线处增加直流蓄电池支撑的方法, 但其均引入了蓄电池, 而蓄电池存在对温度和运行环境要求高、需定期进行全充/全放操作、电池造价高等问题, 制约了该种方案的广泛推广。此外, 还有采用超导储能系统(SMES)或飞轮储能的方式, 这种方式较蓄电池储能造价更高, 用于变频器电源改造上还是过于复杂且昂贵。

本文提出一种基于电力电子器件的变频器低电压无源穿越电源 ILP(Inverter Low-voltage ride-through Power)的解决方案, 避免了现有基于蓄电池等有源穿越电源对温度和运行环境要求高、电池定期全充全放维护耗时较长、电池造价高等问题。首先, 提出了基于三重并联交错 Boost 的直流供电通道+高可靠性的旁路通道+控制电源的完整 ILP 硬件拓扑结构, 使得其电感电流和电容电压的纹波小、变化幅度小, 提高了装置整体的运行效率和可靠性。其次, 设计了多元化的运行模式, 尤其是结合上述拓扑结构及控制方法, 提出的涵盖 ILP 全部硬件系统的定期自检模式, 可在不扰动变频器运行状态前提下实现对装置所有部件的性能测试。针对第 1 代 ILP 控制参数现场整定周期长的问题, 采用了以输出误差二次方为性能指标的单神经元自适应比例-积分(PI)控制方

法对控制算法进行了优化,并进行了仿真验证。最后,在 1 台 15 kW 的样机上进行了实验研究。

1 拓扑结构

ILP 的控制目标是在系统电压跌落时,直流母线电压能保持目标电压值,使变频器能够跨越系统低电压跌落过程,保证负载的持续、可靠运行。设计了基于三重并联交错 Boost 的直流变换通道+高可靠性的旁路通道+控制电源的完整 ILP 硬件拓扑结构,如图 1 所示。其主功率输入为系统三相交流电源,主功率输出包括一路控制电源、一路三相交流电源(旁路通道)和一路直流电源(直流供电通道)。

交流输入电源经保护开关、变压器、UPS 为变频器的控制电源供电,保证在系统电压跌落时,变频器柜控制电源不掉电。

交流输入电源经断路器 QF_1 送入装置,分为 2 路分别为变频器进行供电。一路为交流供电通路,即旁路通道,其将三相交流电经电控开关 KM_3 直接送入变频器 A/B/C 三相交流输入端子;另一路为直流供电通路,三相交流电能经电控开关 KM_1 送入由电感 L_1 和二极管整流桥构成的三相不控整流回路,变换为直流电能并储存于电容 C_1 ,电感 L_2 与 IGBT 构成三重交错并联 Boost 的升压斩波电路,可将 C_1 上的直流电能变换为电压等级更高的直流电能储存于电容 C_2 ,并送入变频器的直流输入端子。电控开关 KM_2 与电阻 R 构成预充电回路,实现在 ILP 初始上电时为电容 C_1 、 C_2 平稳充电功能。

2 运行模式

针对火电厂辅机变频器低电压穿越的应用特点,结合 ILP 独特的主电路拓扑,为 ILP 设置 3 种运行模式:旁路模式、直流供电模式和自检模式。这是其他解决方案所不具备的。

a. 旁路模式。

旁路模式是在系统电压正常的状态下,电能通过交流送电回路送入变频器交流输入端子,ILP 中的电力电子器件均处于旁路状态,不参与装置运行。这样大幅降低了 ILP 装置中电力电子器件投入使用的工作时间,从而降低故障概率,提升给煤机系统整体的连续无故障运行时间和安全可靠性能。

b. 直流供电模式。

直流供电模式是当系统电压发生跌落,进而造成 C_1 上整流得到的直流电压跌落时,ILP 内置的控制系统中的电网电压跌落快速识别算法实时监测到此电压跌落趋势,并达到起停条件,将电感 L_2 与 IGBT 构成的 Boost 斩波升压回路快速投入运行,保证在 A/B/C 三相电压跌落期间, C_2 上的直流电压被抬升,维持到可保证变频器输出功率、电机转矩、电机转速均不变的电压水平。在系统电压跌落结束,恢复正常后,IGBT 停止运行,Boost 回路退出工作状态,变频器的供电仍由三相交流送电回路提供。其交流供电通道与直流供电通道的切换由电力电子器件 IGBT 完成,切换动作时间小于 $1 \mu\text{s}$,为无缝切换,对变频器的稳定运行不会造成冲击。

c. 自检模式。

自检模式不同于常规设备的自检,是在供电系统电压正常的条件下检测 ILP 电气元件的完好性与功率电路可靠性。依据一定时间间隔,如每隔 24 h,控制三重交错并联 Boost 电路,将 ILP 的输出电压抬升至略高于正常整流输出的电压水平,即 1.05 p.u.,可实现在不扰动变频器运行状态前提下完成对装置主功率回路、控制回路、采样回路、保护回路的全面检验,克服了传统意义的自检流程对主功率器件故障检测的不彻底性,防患于未然;避免了在电网电压跌落时,ILP 装置无法正常工作,变频器输出转速、转矩及功率发生变化,变频器停机而造成巨大的经济损失。这也是 ILP 相对于不具备自检功能、运行维护工作量大的常规蓄电池支撑解决方案的显著优势。

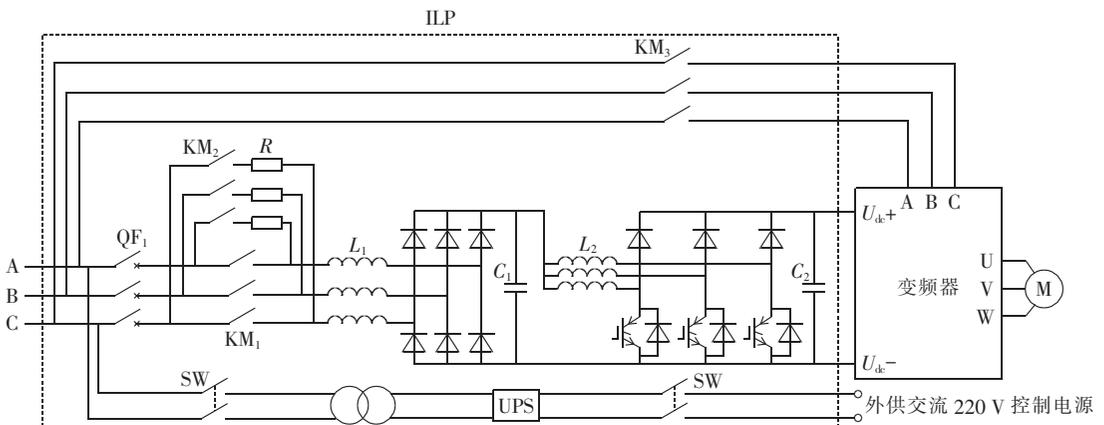


图 1 ILP 主电路拓扑图

Fig.1 Topology of ILP main circuit

之一。

3 直流变换通道控制方法

3.1 电网电压跌落快速识别算法

ILP 直流电源采用平时旁路、供电系统故障时动作的控制方式。因此快速、准确地测量和识别电压跌落,发出起动信号是实现穿越的关键技术之一^[12-15]。

常规异步电机变频器会对直流母线电压进行监视,当出现直流母线电压过低的情况时,变频器会采取相应的保护动作,闭锁变频器输出,以此保证变频器自身的安全。当电力系统中发生短路故障时,会触发一定程度的交流电压跌落,再经过整流桥的整流作用,体现为其内部直流母线电压的跌落。由于变频器具有的直流电容支撑,电网电压跌落快速识别算法通过检测直流侧电容 C_1 上的电压 U_{dc1} 和直流侧电容 C_2 上的电压 U_{dc} 作为装置的起动、退出依据。若直流母线电压 $U_{dc} < U_{dcL}(U_{dcL}$: 跌落电压的起动门限值), 则起动 ILP 直流电源,即控制直流母线电压 U_{dc} 保持目标电压值。正常退出时,判断 U_{dc1} 及其前 2 个采样点电压 U_{dc1_buf1} 、 U_{dc1_buf2} 间的关系,若 $U_{dc1_buf2} - U_{dc1_buf1} > 0$ 、 $U_{dc1} - U_{dc1_buf1} > 0$ 、 $U_{dc1} > U_{dcH}(U_{dcH}$: 跌落电压的退出门限值)同时成立,则延时 1 s 后,封锁 PWM 输出,退出 ILP 直流电源。

3.2 升压闭环自动控制

三重并联交错 Boost 电路是实现变频器低电压穿越的关键部分,其由 3 个 Boost 变换器并联连接,在控制上实现 3 个 Boost 模块均匀分担输入电流,减小开关管的电流应力。同时,使 3 个高频 PWM 开关在相位上均匀错开 120° ,实现高频电感电流的交错,减小了输入电流的高频纹波^[16-18]。

三重 Boost 升压闭环自动控制采用电压、电流双闭环 PI 控制策略,电压环的输出作为电流环的给定 I_{dref} ,其与 3 个并联模块的输入电感电流总和之差输入电流内环 PI 控制器,通过电流环的输出调节占空比 D ,达到保持直流母线电压 U_{dc} 恒定 (540 V) 的控制目标。DC/DC 电路工作于 Boost 升压状态,内环电感电流的方向与参考方向一致,其控制框图如图 2 所示。其中, U_{dc_ref} 为直流母线目标电压; U_{dc} 为装置输出直流电压; I_{dref} 为电流内环的参考电流; I_{L21} 、 I_{L22} 、 I_{L23} 分别为 Boost 电路中流经 3 个电感的电流; I_{dc} 为

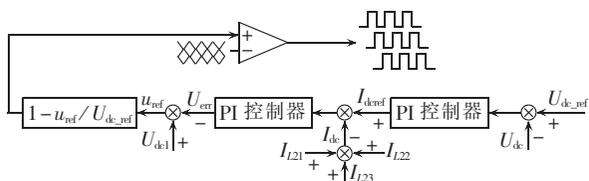


图 2 升压闭环自动控制框图

Fig.2 Block diagram of automatic Boost close-loop control

Boost 电路输入的直流电流即 3 个电感电流之和; U_{er} 为电流内环 PI 控制器的输出; U_{dc1} 为不控整流侧输出电容电压。

考虑到 ILP 直流电源起动后即 Boost 升压过程中,由于控制参数不合适等原因出现电压超调较大,造成变频器过压保护动作的可能,引入双闭环自动控制 + bang-bang 控制相结合的复合控制方法,在闭环自动升压控制中,若 U_{dc} 超过设定限值,则闭锁 ILP 直流电源控制输出。

然而,PI 控制要取得较好的控制效果,就必须调整好比例和积分这 2 种控制作用,形成控制量中既相互配合又相互制约的关系,但这种关系也不是简单的线性组合。传统 PI 控制器的参数是一次整定的,而 ILP 包括起动、穿越过程及退出等不同运行阶段,难以建立精确数学模型。其参数常需要实时在线整定,装置在现场调试中存在现场控制参数整定困难、调试周期较长、现场工作效率不高等问题,有必要探索性地尝试一种简单、易行的参数在线自适应调整方法,为第 2 代 ILP 的研发做技术储备。

神经网络具有任意非线性表达能力,神经网络 PI 控制可通过对系统性能的自学习,从大量的非线性组合中找出最佳的控制参数。但神经网络 PI 控制算法的网络结构复杂,搜索全局或局部最优速度较慢,且计算量大、实时性差。而单神经元具有结构简单、计算简便、调整方便、调整参数联系紧密等特点^[19-20],将其与常规 PI 控制相结合,可解决常规 PI 控制器不易在线实时整定参数和难以对一些复杂过程进行有效控制的问题。

3.3 单神经元自适应 PI 控制

单神经元 PI 控制可以根据给定信号与输出结果改变比例和积分调节器的权值,以保证系统快速跟踪给定,其实质是一个变比例和积分参数控制。本文将单神经元 PI 控制器替换电压外环 PI 控制器来实现直流母线闭环自动升压控制,并设计了基于单神经元的自适应 PI 控制器,其原理如图 3 所示。控制过程为:首先将直流电压参考值 U_{dc_ref} 与测量的直流电容电压 U_{dc} 之差输入到状态变换器得到 2 个变换后的值 x_1 、 x_2 ,将这 2 个量作为神经元的输入。当神经元输入状态的维数为 2 时,如图 3 中虚线框所示即为单神经元模型。通过有监督的 Hebb 学习规则在

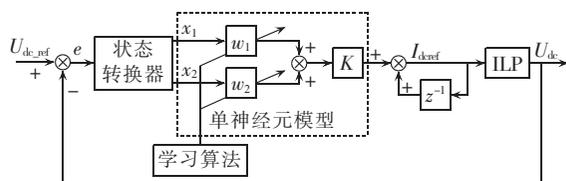


图 3 单神经元 PI 控制器结构图

Fig.3 Structure of single-neuron PI controller

线学习,同时在线修正神经元比例系数 K ,训练完毕后输出 I_{dref} 作为电流内环的电流参考值。

状态转换器的输入反映的是期望输出及实际输出的偏差状态,若输入给定为 U_{dc_ref} ,输出为 U_{dc} ,偏差为 $e(k)$,则经状态转换器后转换为神经元的输入 x_1, x_2 分别为:

$$e(k) = U_{dc_ref}(k) - U_{dc}(k) \quad (1)$$

$$x_1(k) = e(k) \quad (2)$$

$$x_2(k) = \Delta e(k) \quad (3)$$

自适应神经元通过关联搜索产生控制信号,神经元的输出信号 $I_{dref}(k)$ 为:

$$I_{dref}(k) = I_{dref}(k-1) + K \sum_{i=1}^2 w'_i(k) x_i(k) \quad (4)$$

$$w'_i(k) = w_i(k) / \sum_{i=1}^2 |w_i(k)| \quad i=1,2 \quad (5)$$

其中, $w_i(k)$ 为对应 $x_i(k)$ 的加权系数; K 为神经元的比例系数, $K > 0$; I_{dref} 为神经元输出。

单神经元自适应控制器通过对加权系数的调整来实现自适应、自组织功能。考虑到加权系数 $w_i(k)$ 与神经元的输入、输出和输出偏差三者的相关函数有关,因此在采用有监督的 Hebb 学习规则时有:

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \eta r_i(k) \quad (6)$$

$$r_i(k) = z(k) I_{dref}(k) x_i(k) \quad (7)$$

其中, $r_i(k)$ 为递进信号,随控制过程渐衰减; $z(k)$ 为误差信号, $z(k) = U_{dc_ref}(k) - U_{dc}(k)$; η 为学习速率, $\eta > 0$ 。

定义以输出误差二次方为单神经元自适应 PI 控制器的性能指标函数:

$$E_1 = -0.5 [U_{dc_ref}(k) - U_{dc}(k+1)]^2 = -0.5 z^2(k+1) \quad (8)$$

使加权系数 $w_i(k)$ 的修正方向沿着 E_1 减小的方向,对 $w_i(k)$ 的负梯度方向搜索调整。 E_1 关于 $w_i(k)$ 的梯度为:

$$\frac{\partial E_1}{\partial w_i(k)} = -z(k+1) \frac{\partial U_{dc}(k+1)}{\partial I_{dref}(k)} \frac{\partial I_{dref}(k)}{\partial w_i(k)} \quad (9)$$

所以 $w_i(k)$ 的调整量为:

$$\Delta w_i(k) = w_i(k+1) - w_i(k) = -\eta_m \frac{\partial E_1}{\partial w_i(k+1)} =$$

$$\eta_m z(k+1) x_i(k) \frac{\partial U_{dc}(k+1)}{\partial I_{dref}(k)} \quad i=1,2 \quad (10)$$

其中, $m=I, P$; m 为 I 时, η_m 为积分系数的学习速率; m 为 P 时, η_m 为比例系数的学习速率。

由于 $\partial U_{dc}(k+1) / \partial I_{dref}(k)$ 未知,这里采用近似符号函数 $\text{sgn}[\partial U_{dc}(k+1) / \partial I_{dref}(k)]$ 取代,由此带来的不精确的影响可通过调整学习速率 η_m 来补偿^[21]。整理单神经元 PI 学习算法可得:

$$w_1(k+1) = w_1(k) + \eta_I K z(k+1) \times x_1(k) \text{sgn} \left[\frac{\partial U_{dc}(k+1)}{\partial I_{dref}(k)} \right] \quad (11)$$

$$w_2(k+1) = w_2(k) + \eta_P K z(k+1) \times x_2(k) \text{sgn} \left[\frac{\partial U_{dc}(k+1)}{\partial I_{dref}(k)} \right] \quad (12)$$

4 ILP 实验验证及应用

4.1 电磁暂态仿真实验及分析

根据本文提出的 ILP 拓扑结构及控制策略,基于 PSCAD/EMTDC 对 ILP 系统进行建模,并通过编程创建自定义模块来实现升压闭环自动控制。该仿真系统结构如图 4 所示。仿真系统的额定交流输入电压为 380 V;系统电压跌落至 30% 的额定电压;额定直流输出电压为 540 V;穿越时间为 900 ms;开关管的开关频率为 4 kHz;采样周期为 5 μ s;输入滤波电感为 2 mH,输出滤波电容为 4700 μ F。仿真系统中闭环自动控制模块的电压外环分别采用常规 PI 控制器和单神经元自适应 PI 控制器,电流内环采用传统方式的 PI 控制器,既能满足需要,又简化控制程序。

图 5 给出了电压跌落且未投入 ILP 时的系统电压及直流母线电压波形。由图 5 可见,当系统电压跌落时,若不起动 ILP,直流母线电容电压也将跌落; $t=1$ s 时,系统电压跌落;1.9 s 后,系统开始恢复到跌落前的系统电压和直流母线电容电压。

为验证 ILP 直流变换通道中采用三重并联交错

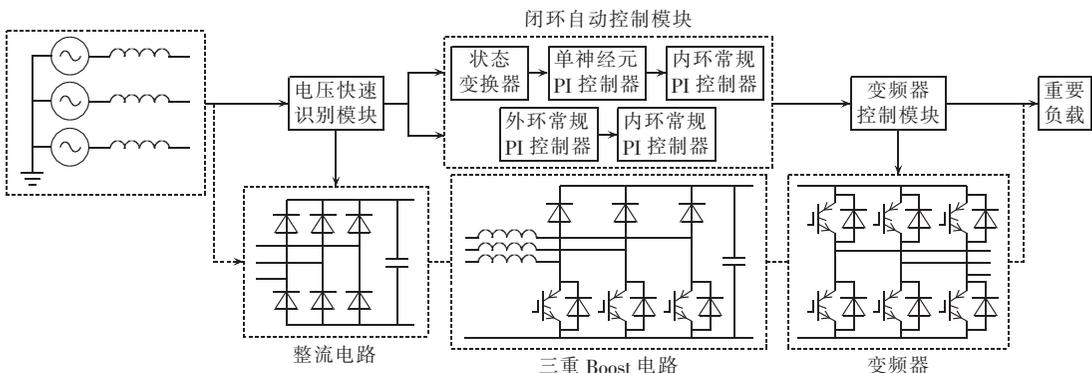


图 4 ILP 仿真系统结构图

Fig.4 Structure of ILP simulation system

Boost 对 ILP 直流输出电压稳态性能的改善作用,仿真中在采用常规双闭环 PI 控制器的情况下,分别采用普通 Boost 电路与三重并联交错 Boost 电路,得到的直流母线电压波形分别如图 6 和图 7 所示。

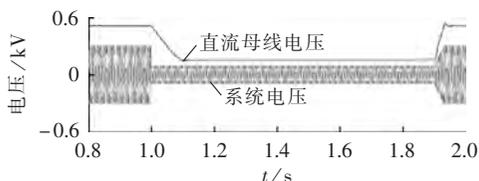


图 5 电压跌落时,投入 ILP 前系统电压及直流母线电压波形

Fig.5 Waveform of system voltage and DC bus voltage during voltage dip, without ILP

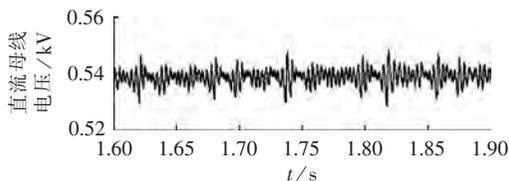


图 6 采用普通 Boost 电路时的直流母线电压波形

Fig.6 Waveform of DC bus voltage, when common Boost circuit is adopted

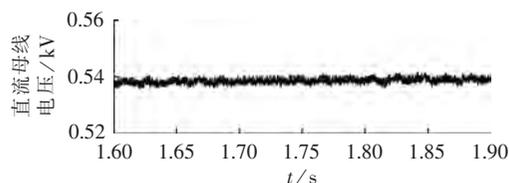


图 7 采用三重并联交错 Boost 电路后的直流母线电压

Fig.7 Waveform of DC bus voltage, when triple parallel interleaving Boost circuit is adopted

由图 6 和图 7 可看出,系统电压跌落至 30% 的额定电压后,直流变换通道采用普通 Boost 拓扑时,直流母线电压纹波的峰峰值为 15 V;采用三重并联交错 Boost 后,直流母线电压纹波的峰峰值为 3.5 V。因此,ILP 采用三重并联交错 Boost 后,其交流电压的纹波更小,极大改善了 ILP 的稳态性能。

为验证本文提出的单神经元 PI 控制在改善 ILP 的动态性能及控制参数的自适应性上的优势,在升压闭环自动控制双闭环的外环控制器环节分别采用单神经元 PI 控制器和常规 PI 控制器进行了仿真。

单神经元 PI 可调参数有 3 个:权值学习速率 η_p 、 η_i 和神经元比例系数 K 。由于 K 具有在线自适应调整作用,使学习速率对控制特性影响很小,所以学习速率的初值可设置为一组任意值,这样 K 为影响控制特性的主要参数。其整定方法与常规 PI 控制比例系数整定方法一致。经过仿真校正,取 $\eta_p=5$ 、 $\eta_i=15$ 、 $K=0.002$ 时,电流内环的比例和积分参数分别为 10 和 1,仿真结果如图 8 和图 9 所示。

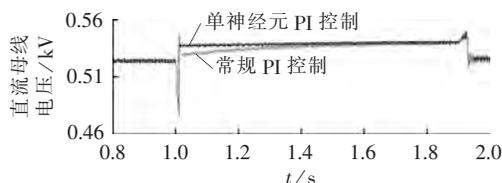


图 8 ILP 运行全过程仿真结果

Fig.8 Simulative results of whole ILP operation

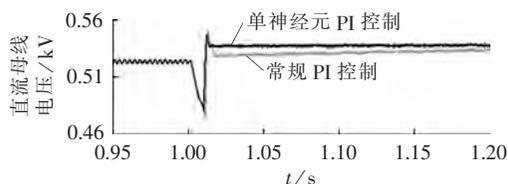


图 9 ILP 起动过程仿真结果

Fig.9 Simulative results during ILP startup

由图 5 可以看出,未投入 ILP 时,交流电压跌落至 30% 的额定电压后,直流电压也响应跌落。从图 8 可以看出,不论 ILP 采用常规 PI 控制器或单神经元 PI 控制器,跌落后的电压都可以泵升至额定电压水平,保证变频器低压保护不动作,负载可在系统电压跌落,持续运行。由图 9 可以看出,常规的 PI 控制在 ILP 起动后控制响应缓慢,并且直流母线电压有超调,不能达到良好的跟踪效果;单神经元 PI 控制由于参数在线更新,系统电压于 1 s 跌落至 30% 的额定电压后,直流侧电容电压在 16 ms 就基本稳定,恢复到了 540 V,其上升时间为 12 ms,不到常规 PI 控制下上升时间的 62.8%,其超调为 8.5%,也远远小于常规 PI 控制下的超调。ILP 退出运行时,2 种控制器的控制效果差异不大。

可见,单神经元 PI 控制具有一定的自适应能力,能够改善直流母线电压振荡,响应快速,超调较小,在 ILP 的不同工作阶段及不同电压跌落深度时系统均具有良好的鲁棒性,尤其是起动阶段作用明显,提高了 ILP 系统的动态性能。当然,若有一定专家经验也可采用常规 PI 控制得到如上控制效果。本文意在探索性地尝试一种简单、易行的参数在线自适应调整的方法,下一步将应用到第 2 代 ILP 中,解决装置现场调试中控制参数整定困难和现场调试周期较长等问题。

4.2 现场实验及分析

应用本文所介绍的方案,开发了 ILP 及控制系统。以下以华能伊敏煤电有限责任公司发电厂给煤机的 ILP 装置为例,给出了现场试验结果。ILP 主要电气参数如下:额定功率为 15 kW;额定电压为 380 V;最低穿越电压为 76 V(0.2 p.u.);系统电压跌落至 20% 的额定电压;故障持续时间为 1 s。ILP 联调运行结果如图 10—13 所示。其中, U_{dcl} 为不控整流后电容 C_1 上的电压; U_{dc} 为 Boost 电路后电容 C_2 上的电压; u_s 为系统线电压; I_{dk} 为三重 Boost 电路输入的直流

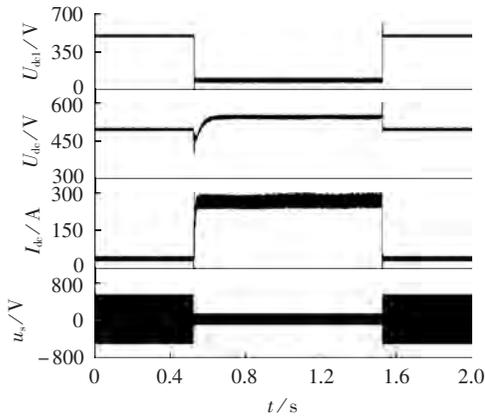


图 10 ILP 运行全过程实验结果

Fig.10 Experimental results of whole ILP operation

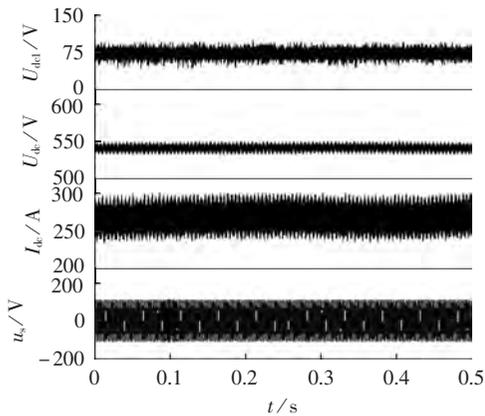


图 12 低电压穿越过程实验结果

Fig.12 Experimental results during LVRT

电流。

如图 10 所示,当系统电压跌落至 20% 的额定电压后,ILP 的投入将直流母线电压保持到 540 V,使系统具有良好的稳定性及鲁棒性,避免了系统电压跌落造成的变频器低压保护动作。

从图 11 可以看出,系统电压跌落至 20% 的额定电压后,直流侧电容电压在 40 ms 就基本恢复到了 540 V,其上升时间为 19 ms,响应快速,基本无超调。从图 12 可以看出在穿越过程中 ILP 稳态特性良好。从图 13 可以看出 ILP 退出平稳,虽然有一定超调,但远未达到变频器低压保护的動作条件。

4.3 实际应用

自 2011 年 9 月份投入市场以来,根据本文所述方法设计开发的 ILP 在东北三省、内蒙古等地区 31 家电厂的 324 台辅机变频器的低电压穿越中得到成功应用。从电厂的反馈来看,所设计的 ILP 使得变频器完全不受系统电压跌落的影响;其多元化运行模式和免维护设计提高了装置可靠性,减轻了工作人员的工作量,提高了整体效率。从华能伊敏煤电有限公司发电厂和神华内蒙古国华呼伦贝尔电厂提供的用户报告来看,投运至今装置运行状况稳定、良好。

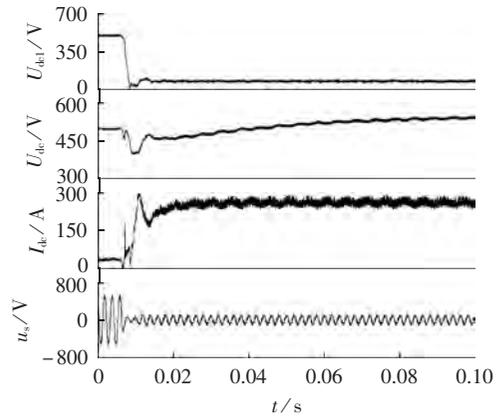


图 11 ILP 起动过程实验结果

Fig.11 Experimental results during ILP startup

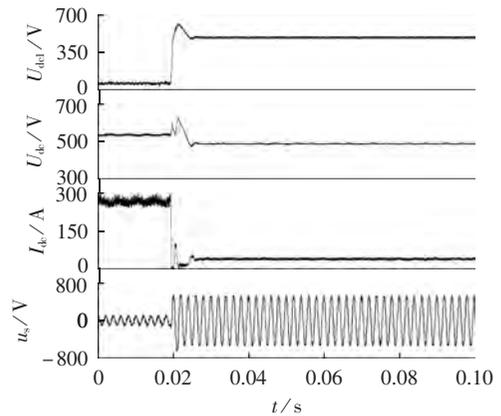


图 13 ILP 退出过程实验结果

Fig.13 Experimental results during ILP quit

5 结论

本文针对火电厂重要辅机变频器低电压穿越的应用需求,提出了一种基于电力电子器件的 ILP 装置,其具有以下优点。

a. 多重并联交错的 Boost 结构,提高了输出直流电能质量,改善了稳态输出特性,降低了设备造价,保证了装置可靠性;旁路通道的设计,降低了装置常态损耗与故障风险。

b. 多元化工作模式的设计,保证了装置的可靠性和安全性。尤其是涵盖全部硬件系统的定期自检模式,克服了传统的自检流程对主功率器件故障检测的不彻底性。

c. 在常规闭环升压自动控制 + bang-bang 控制的复合控制策略的基础上,引入具有自学习能力的单神经元 PI 控制算法进行控制算法优化,提高了 ILP 的动态响应性能,探索性地尝试了一种简单、易行的参数在线自适应调整的方法,下一步将应用到第 2 代 ILP 中,解决装置现场调试中控制参数整定困难和现场调试周期较长等问题。

d. 本文所设计的 ILP 已成功应用于包括华能伊敏电厂在内的 31 家电厂的 324 台变频器的低电压

穿越中,提高了电厂的安全可靠性,节省了火电厂辅机变频器更新换代的巨额费用,避免了在供电系统发生故障时,辅机变频器闭锁造成的发电机组非计划停机造成的巨大经济损失,同时也可冶金、石化、医院等其他行业的不间断电源的设计提供参考。

参考文献:

- [1] 韩安荣. 通用变频器及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2002:381-394.
- [2] 钱可弭,沙励,林松秋,等. 变频器在火力发电厂的应用[J]. 电力自动化设备,2001,21(7):60-61.
QIAN Kemi,SHA Li,LIN Songqiu,et al. Application of frequency converter in thermal power plant[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(7):60-61.
- [3] 贾贵玺,高跃,贺家李,等. 高压变频调速技术在发电厂节能方面的研究与应用[J]. 电力系统自动化,2002,26(14):1-4.
JIA Guixi,GAO Yue,HE Jialin,et al. Research and application of high voltage variable frequency speed regulation in power plants[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(14):1-4.
- [4] 于庆广,闵勇,朱洪波,等. 热电厂循环水泵高压变频调速控制系统研究和实现[J]. 电力系统自动化,2003,27(7):70-73.
YU Qingguang,MIN Yong,ZHU Hongbo,et al. Study and implementation of high-voltage variable-frequency speed adjustable control system of cycle water pump system in thermal power plant[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(7):70-73.
- [5] HAFIDZ S A,BASU K P. Ride through capabilities of load during voltage sag/swell and power interruption with zigzag transformer[C]//2008 IEEE Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Application. Cyberjaya, Malaysia:IEEE,2008:119-122.
- [6] 张海涛,赵争鸣,袁立强,等. 一种新的应用于高压大容量变频器的失电跨越控制策略[J]. 电工电能新技术,2006,25(3):68-71.
ZHANG Haitao,ZHAO Zhengming,YUAN Liqiang,et al. A new control strategy of power loss ride through in MV inverters[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2006,25(3):68-71.
- [7] MONTERO-HERNANDEZ O C,ENJETI P N. Ride-through for critical loads[J]. IEEE Trans on Industry Applications,2002,8(6):45-53.
- [8] 刘国起. 用变频器自动重起功能消除电网瞬时低压或瞬时停电[J]. 电工技术,2006(1):76.
LIU Guoqi. Elimination of power grid instantaneous low voltage or power off using restarting function of inverter[J]. Electric Engineering,2006(1):76.
- [9] 孔维涛,张庆范,李瑞来,等. 电网瞬时停电保持变频器母线电压的新方法[J]. 电工技术学报,2006,21(6):54-58.
KONG Weitao,ZHANG Qingfan,LI Ruilai,et al. Novel method of maintaining D.C. link voltage of inverter in power interruption[J]. Transaction of China Electrotechnical Society,2006,21(6):54-58.
- [10] 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):89-91.
PANG Shenghan,JIANG Wei. Application of LVRT equipment in frequency inverters of coal feeder[J]. Electrical Engineering,2013(3):89-91.
- [11] NAIDOO R,PILLAY P. A new method of voltage sag and swell detection[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2007,22(2):1056-1063.
- [12] MONTERO-HERNANDEZ O C,ENJETI P N. A fast detection algorithm suitable for mitigation of numerous power quality disturbances[J]. IEEE Trans on Industry Applications,2005,41(6):1684-1690.
- [13] 易桂平,胡仁杰. 基于超级电容储能系统的动态电压恢复器研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(12):21-25.
YI Guiping,HU Renjie. Dynamic voltage restorer based on super capacitor energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(12):21-25.
- [14] 周卫平,吴正国,夏立,等. 基于电容谐波电流抑制的动态电压恢复器控制方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):64-68.
ZHOU Weiping,WU Zhengguo,XIA Li,et al. Dynamic voltage restorer based on capacitor harmonic current suppression[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):64-68.
- [15] 王宝安,孟庆刚,商娇,等. 一种新型动态电压恢复器的仿真与实验[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):25-29.
WANG Baoan,MENG Qinggang,SHANG Jiao,et al. Simulation and experiment of new-type dynamic voltage restorer[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9):25-29.
- [16] 东北电网有限公司,北京四方继保自动化股份有限公司,华能伊敏煤电有限责任公司发电厂,等. 具有低电压穿越能力的变频器稳压电源装置:中国,CN102299644A[P]. 2011-12-28.
- [17] 易灵芝,何东,王书颖,等. 面向直流楼宇供电技术的新型多输入 Buck-Boost 变换器[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):86-91.
YI Lingzhi,HE Dong,WANG Shuhao,et al. Multi-input Buck-Boost converter for DC building power supply[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):86-91.
- [18] 郭锦,罗安,黎燕,等. 新型光伏逆变器及其前馈功率预测控制[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):119-123.
GUO Lu,LUO An,LI Yan,et al. New photovoltaic inverter and its feedforward power predictive control[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):119-123.
- [19] 刘金琨. 先进 PIDMATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2004:158-162.
- [20] 张珍珍,邹见效. 基于神经网络的半直驱永磁同步风力发电机组有功功率控制[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):130-136.
ZHANG Zhenzhen,ZOU Jianxiao. Active power control based on neural network for half-direct permanent-magnet wind power generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9):130-136.
- [21] 林莘,王德顺,徐建源,等. 单神经元 PID 控制器在高压断路器运动控制技术中的应用[J]. 电工技术学报,2009,24(6):108-113.
LIN Xin,WANG Deshun,XU Jianyuan,et al. Application of single neuron pid high voltage controller in movement control of circuit breaker[J]. Transaction of China Electrotechnical Society,2009,24(6):108-113.

作者简介:



王晓宇(1984—),女,内蒙古鄂尔多斯人,博士研究生,从事大功率变流器控制、新能源并网方面的研究(E-mail:wangxybs@163.com);

张涛(1971—),男,江西萍乡人,教授级高级工程师,硕士,从事电力系统保护与控制、电力电子技术在电力系统中的应用、新能源并网方面的研究;

刘树(1981—),男,天津人,工程师,硕士,研究方向为变流器主回路设计和新能源控制技术。

Power source with low-voltage ride-through capability for auxiliary equipment inverter of thermal power plant

WANG Xiaoyu¹,ZHANG Tao²,LIU Shu²,CAO Fengmei²,LIU Zhichao²,YANG Qixun^{1,2}

(1. State Key Lab of New Energy Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: Since the low-voltage protection of auxiliary equipment inverter may trip the equipment due to bus voltage sag, leading to the unscheduled unit shutdown of thermal power plant, a power source with low-voltage ride-through capability based on the power electronic devices is designed for the passive inverter. Its main circuit consists of an AC-DC converter based on the triple parallel interleaving Boost circuit with reduced inductor current and capacitor voltage ripple, a three-phase AC bypass channel with high reliability and a single-phase AC power source for control. A method of fast grid-voltage-sag detection and multiple operating modes are proposed according to its topology. A strategy of single-neuron adaptive PI control with the square output error as its performance index is adopted to facilitate the control parameter setting and site commissioning. The results of electromagnetic transient simulation, field test and actual application show that, the designed device has better dynamic and static output characteristics and effective low-voltage ride-through capability.

Key words: thermal power plant; electric inverters; low-voltage ride-through; electric power supplies to apparatus; grid voltage sag; single-neuron PI; neural networks

(上接第 125 页 continued from page 125)

Dynamic strategy based on entropy weight theory for parallel restoration of generators

LIANG Bomiao¹, LIN Zhenzhi¹, WEN Fushuan¹, YE Lin²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China)

Abstract: The parallel restoration can accelerate the restoration from serious blackout and reduce the outage loss and social impact. The researches of parallel restoration are normally focused on the sectionalizing strategies and restoration scheme evaluation while the study of dynamic parallel restoration strategy at a global level is not found. The optimal restoration strategy is developed with the consideration of whole generator sets. The output power of restored units, the input power needed for restoring the candidate unit and its contribution to the global system restoration are analyzed first according to the status information of generators for each restoration scheme. A mixed integer linear programming model is then built based on the entropy weight theory for the dynamic optimization and decision-making of parallel generators restoration and the optimal combination of restoration schemes without conflicts is obtained. The proposed model fully considers the status information of every generator and appropriately coordinates the power demands among generators. The feasibility and effectiveness of the proposed method is verified by New England 10-unit 39-bus power system.

Key words: electric power systems; restoration; parallel restoration; dynamic strategy; entropy weight theory; MILP; outages