

一种循环水泵变极电机的切换控制技术研究

高大朋, 何 亮*, 骆 攀, 刘品超, 韩剑波, 陈凯旋,
周炳呈, 刘堂胜, 谢 峰

(中国核动力研究设计院核反应堆技术全国重点实验室, 四川 成都 610200)

Research on Switching Control Technology for Pole-Changing Motors in Circulating Water Pumps

GAO Dapeng, HE Liang*, LUO Pan, LIU Pinchao, HAN Jianbo, CHEN Kaixuan,
ZHOU Bingcheng, LIU Tangsheng, XIE Feng

(National Key Laboratory of Nuclear Reactor Technology, Nuclear Power Institute of China,
Chengdu 610200, China)

Abstract: [Objective] The circulation water pump adopts a shielded three-phase AC asynchronous pole-changing motor. During the high-speed to low-speed mode transition and the low-speed to high-speed mode transition, this motor requires an extended power interruption period, resulting in significant drops in both motor speed and process loop flow rate. To address this mode transition challenge, a novel bidirectional control strategy for seamless switching between high-speed and low-speed operation modes is proposed at the paper.

[Methods] First, taking the pole-changing motor of the circulation water pump as the analysis object, a simulation model of the pole-changing motor was established based on the pole-changing principle and the mathematical equations of AC asynchronous motors. A simulation model for low-speed and high-speed drive control of the pole-changing motor was then constructed. To minimize the flow rate drop during the switching process, with the goal of reducing motor speed drop, the dynamic characteristics of parameters such as the motor's residual electromotive force and speed during mutual switching between high-speed and low-speed modes were investigated. Concurrently, considering the operational constraints during pole-changing motor mode transition, a control strategy for switching from low-speed to high-speed and from high-speed to low-speed was designed. The proposed control strategy was applied to the development of the frequency converter power supply for the circulation water pump. Bench tests demonstrated excellent compatibility between the power supply and the circulation water pump.

[Results] The experimental results confirmed that smooth switching between high-speed and low-speed operation modes were achieved, and operation mode switching requirements for circulation water pump. During the transition from high-speed to low-speed mode, the speed fluctuation was controlled within 22.7% and the flow fluctuation was maintained within 22.7%. Conversely, during the transition from low-speed to high-speed mode, the speed fluctuation was limited to 25.4% and the flow fluctuation was kept within 25.5%.

[Conclusion] The pole-changing strategy proposed in this paper for switching between high-speed and low-speed operation modes of circulating water pump motors effectively resolves the challenges of operational mode transition, demonstrating significant engineering applicability.

Key words: circulating water pump; pole-changing motor; speed fluctuation; flow fluctuation

摘 要: 【目的】循环水泵采用屏蔽式三相交流异步变极电机,该变极电机高速和低速工况切换过程需要断电较长时间,导致电机转速及工艺回路流量出现大幅度跌落。为实现上述工况平稳切换,本文提出了一种高速、低速工况相互切换的控制策略。【方法】首先以该循环水泵的变极电机为分析对象,利用电机变极原理及交流异步电机数学方程,建立了变极电机的仿真模型,搭建了变极电机低速、高速驱动控制仿真模型。为尽量减少切换过程回路流量跌落以减少电机转速跌落为目的,分别研究了变极电机高速、低速相互切换过程中电机剩余感应电动势、电机转速等参数的动态变化特征。结合变极电机工况切换过程需要考虑的限制性条件,针对性设计了变极电机低速切高速和高速切低速控制策略。将该控制策略应用

基金项目: 国家自然科学基金(U2267206)

National Natural Science Foundation of China (U2267206)

于循环水泵配套的变频电源研制中,通过台架试验验证了变频电源与循环水泵之间的匹配性。【结果】试验结果表明,该控制策略较好地实现了循环水泵高速与低速工况之间的平稳切换,满足循环水泵对运行工况切换的要求。高速切换至低速过程中将转速跌落、回路流量跌落控制在 22.7%,低速切换至高速过程中将转速跌落、回路流量跌落控制在 25.4% 和 25.5%。【结论】本文提出的循环水泵变极电机高速、低速工况之间的相互切换策略,较好地解决了循环水泵的工况切换难题,具有较高的工程应用价值。

关键词: 循环水泵;变极电机;转速跌落;回路流量跌落

0 引言

异步电机针对需要两种及以上转速运行的场合,可使用变极电机实现工况切换控制,在工业领域有广泛的应用^[1-2]。变极电机极对数切换调速策略的提出,可有效解决调速范围和高效率工作区域窄、适用环境单一的问题。针对变极电机,不同极对数间的切换使电机在不同的转速区间内均可获得较高的运行效率,真正实现异步电机在负载工况下的宽调速运行^[3-6]。一些传统的极对数切换方法,切换时必须停电操作,而且切换瞬间会有较大的电流冲击、无转矩输出,使得整个切换过程不连续、不平滑^[7]。同时,变极电机绕组切换是变极电机设计的关键技术之一,电机绕组为感性元器件,切换过程中电流的突变会感应出数千伏的电压,可能会烧毁电路中的器件,合理的切换控制策略是保证电机及相关控制电路安全稳定运行的前提^[8-9]。

针对不同应用场景,研究人员提出了相应的控制方法。针对多相感应电机的应用场合,一些研究人员尝试使用变频调速加上变极控制的方法来实现低速大转矩并扩大恒功率调速的范围^[10-11]。文献[12]提出一种基于指数响应的多相感应电机电子变极调速方法。针对普通感应电机,文献[13]中提出的变极控制方法是在低速时采用大的极对数,在高速时采用小的极对数,可以满足低速大转矩和宽的恒功率运行范围的运行要求,但需要停电切换且切换过程是不连续的,伴随着冲击电流和冲击转矩产生。文献[14]则研究了永磁同步电动机绕组的切换,建立了双级数动态仿真模型,研究了不同转速、转动惯量及负载转

矩等条件下切换时电机切换过程的动态行为。

本文的研究对象为试验台架的循环水泵,该循环水泵采用屏蔽泵电机设计理念,将泵体和电机紧密结合。电机的定子和转子部分采用屏蔽套隔离,以满足台架试验防止回路流质泄漏的要求。循环水泵用于驱动冷却介质对高温高压反应容器的冷却,如运行过程中回路流量跌落幅度超过低速运行工况流量的 35%,则可能导致高温高压反应容器密封性能的损坏。而试验台架回路运行存在高、低速两种工况且须经常在这两种工况之间切换,因此台架运行过程中需确保循环水泵的高速、低速工况之间的切换过程中回路流质流量跌落幅度不超过 35%,否则会影响台架试验回路安全运行并触发保护停机。因循环水泵高速电机功率较大、需采用变频启动的方式,来减少启动过程中的冲击电流,且高、低速工况之间存在频繁切换的需求,切换过程还需要尽量缩短切换时间且尽量减少上述瞬态过程中的回路流质流量跌落。项目初期,通过采购某知名品牌移相级联型变频器并开展了低速切高速试验,试验过程中循环水泵驱动回路流质流量由低速额定工况的 180 m³/h 跌落至最低 56 m³/h,流量跌落幅度达 68.9% 远大于 35% 的限制,流量跌落持续时间达 7.5 s,且变频器参数不能再进一步优化。

为较好的解决该问题,以屏蔽泵的 4/8 极感应变极电机为分析对象,利用变极原理及电机数学方程,建立了变极电机切换的数学仿真模型,对其高、低速工况之间的相互切换过程进行了研究,分别对切换过程中的转速、感应电动势的动态行为进行了分析,确定了相应的切换控制策略,并成功将控制策略应用于后续为循环水泵电机专门研制的配套变频电源系统研制中。试验结果表明,该控制策略较好地实现了切换过程中流量快速、平稳过渡,也为今后类似场合变极电机的切换控制提供了参考。

1 循环水泵变极电机切换控制存在的问题

考虑到循环水泵采用的 1 000 kW/3 kV 变极电机容量较大的特点,变极电机高速工况采用变频启动、低速工况采用直接启动。变极电机高、低

速之间的切换控制需要解决 3 个主要问题。

(1) 变极电机高低速切换过程中的变极控制和以往双绕组电机不同, 变极电机高、低速绕组采用同一个定子绕组, 高、低速相互切换控制过程中需要改变变极电机绕组型式, 以得到高、低速工况运行所需的极对数, 从而得到不同的变极电机转速。若上述过程出现异常则可能会引起供电回路短路、电机反转及电流或功率因数异常等问题, 这势必影响到变极电机的安全可靠运行。

(2) 变极电机高、低速切换运行时不允许同时通电, 而在变极电机电源切断后, 考虑到电机绕组为感性负载, 在断电的瞬间绕组会感应出较高的感应电动势, 且该感应电动势并不会立即消失。此时如果快速变极通电, 则可能产生较高的冲击电压、冲击电流和冲击转矩, 这将对变极电机及供电电网造成危害, 并引起线路继电保护误动作等问题。

(3) 变极电机低切高过程中高速变频启动控制需要跟踪电机转速并开始变频启动, 不同的变频启动控制策略其锁频所需时间、转矩控制策略均不一样, 最终会导致切换过程中的转速跌落幅度不一致, 进而会影响到台架回路流量的跌落幅度。因此需要对不同的变频启动控制策略进行对比分析, 明确最优的变频启动控制策略。

针对上述 3 个问题, 需要重点分析高低速绕组切换时机、变频控制策略对电机控制的影响。

2 电机变极控制原理及建模

2.1 变极控制原理

根据变极电机原理^[1-2], 其定子内仅放置一套绕组并从该绕组中间引出一组中间抽头, 电机运行时通过改变外部抽头的接线组合可分别得到高、低速运行所需的极对数, 从而得到不同的电机转速。单绕组变极电机的高、低速定子绕组结构如图 1 所示, 其运行控制的基本原理如下。

(1) 当需要低速运行时, 在电机外部通过对抽头进行组合, 使得定子绕组接线方式为单星型, 这时电机通过低速抽头 (U1、V1、W1) 供电, 即可实现变极电机运行在低速工况。

(2) 当需要高速运行时, 首先需要短接 (U1、V1、W1) 抽头, 将定子绕组的接线方式改变为双

高大朋, 等: 一种循环水泵变极电机的切换控制技术研究

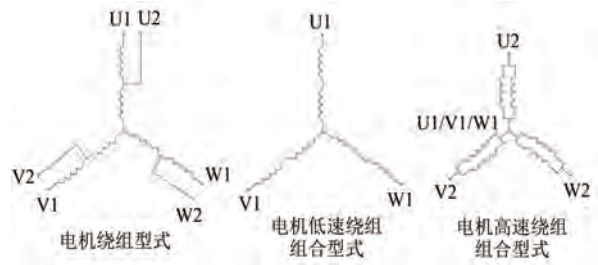


图 1 单绕组变极电机绕组结构

Fig. 1 Motor winding structure of pole-changing motor

星型, 这时电机通过高速抽头 (U2、V2、W2) 供电, 即可实现变极电机运行在高速工况。

2.2 电机仿真模型

变极电机参数如表 1 所示。基于 Matlab 环境下的 Simulink 平台搭建了该电机的电气仿真模型^[15-20], 如图 2 所示。

表 1 变极电机参数

Tab. 1 Parameters of pole-changing motor

参数名称	运行工况	
	低速	高速
定子电阻 r_1/Ω	0.350 2	0.078 5
转子电阻 r_2'/Ω	0.717 0	0.140 9
定子电抗 $X_{1\sigma}/\Omega$	6.812	0.826 1
转子电抗 $X_{2\sigma}'/\Omega$	13.463	2.028
屏蔽套等效电阻 Ω	412.912	99.7
极对数 p	8	4
转动惯量 $J_r/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	42.5	42.5

变极电机的电气仿真模型主要由电压坐标变换模型、磁链模型、电流模型、电流变换模型以及转矩估算模型组成。

(1) 电压坐标变换模型

电压坐标变换模型包含 Clark 变换和 Park 变换两部分, Clark 变换方程如式 (1) 所示, Park 变换方程如式 (2) 所示:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: i_a 、 i_b 、 i_c 为三相静止坐标系下电机的定子电流; i_α 、 i_β 为两相静止坐标系下电机的定子电流; i_d 、 i_q 为两相旋转坐标系下电机的定子电流;

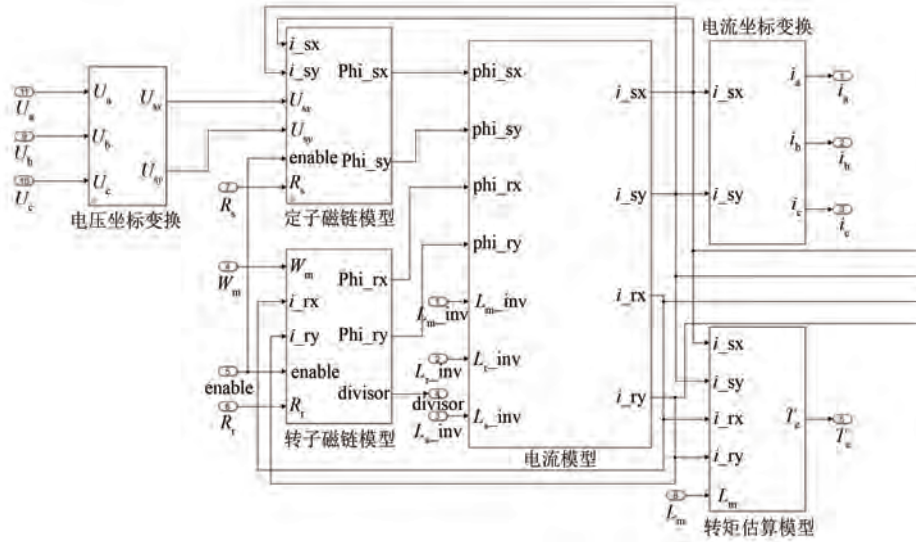


图 2 变极电机的电气仿真模型

Fig. 2 Electrical simulation model of pole-changing motor

φ 为两相旋转坐标系相对于其他坐标系的旋转角度。

(2) 磁链模型

磁链模型包含了定子磁链模型和转子磁链模型:定子磁链模型通过实时积分运算,计算出模型中定子侧磁链的大小;转子磁链模型中电压为 0,故未在模型中体现,同样通过实时积分运算,计算出模型中转子侧磁链的大小。定、转子电压方程如式(3)所示:

$$\begin{cases} u_d = r_1 i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \psi_q \\ u_q = r_1 i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r \psi_d \\ 0 = r_{2d} i_{2d} + \frac{d\psi_{2d}}{dt} \\ 0 = r_{2q} i_{2q} + \frac{d\psi_{2q}}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 和 ψ_d 、 ψ_q 分别为定子 d 、 q 轴电压、电流和磁链; r_1 为定子绕组相电阻; r_{2d} 、 r_{2q} 、 i_{2d} 、 i_{2q} 和 ψ_{2d} 、 ψ_{2q} 分别为转子 d 、 q 轴绕组的电阻、电流和磁链; ω_r 为转子电角速度。

(3) 电流模型

电流模型通过定子和转子间的磁链耦合作用,将定转子电流依次进行估算,得到模型中瞬时电流的数值。电流模型中的磁链方程如式(4)所示:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + L_{ad} i_{2d} - \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q + L_{aq} i_{2q} \\ \psi_{2d} = L_{2d} i_{2d} + L_{ad} i_d + \psi_f \\ \psi_{2q} = L_{2q} i_{2q} + L_{aq} i_q \end{cases} \quad (4)$$

式中: L_d 、 L_q 分别为定子 d 、 q 轴电感; L_{2d} 、 L_{2q} 分别为转子 d 、 q 轴电感; L_{ad} 、 L_{aq} 分别为定转子之间 d 、 q 轴的互感。

(4) 电流变换模型

电流变换模型同样包含反 Park 变换和反 Clark 变换两组坐标变换。反 Park 变换方程如式(5)所示,反 Clark 变换方程如式(6)所示:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

(5) 转矩估算模型

转矩估算模型通过电磁转矩方程,实现对模型中瞬时转矩的估算,用于驱动仿真模型中的负载。该模型中包含了电磁转矩方程和转子机械运动方程,电磁转矩方程如式(7)所示:

$$T_e = \frac{mp}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (7)$$

式中: m 为电机的相数; p 为电机的极对数。

转子机械运动方程如式(8)所示:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = p(T_e - T_L) \quad (8)$$

式中: T_L 为负载转矩; J 为转子和所带负载总的转动惯量。

2.3 变极电机切换控制仿真模型

在开展变极电机仿真模型设计的基础上,搭建了变极电机低速起动控制模型和高速起动控制

模型^[21-23],如图3所示。该仿真模型主要由变极电机模型、变频驱动控制模型、接触器模型和电源模型组成,通过该模型可实现变极电机高切低、低切高的切换控制仿真。

其中,在变极电机变频驱动模型中,为验证不同变频起动方式对变极电机低切高过程的影响,分别设计了多套变频起动控制策略。

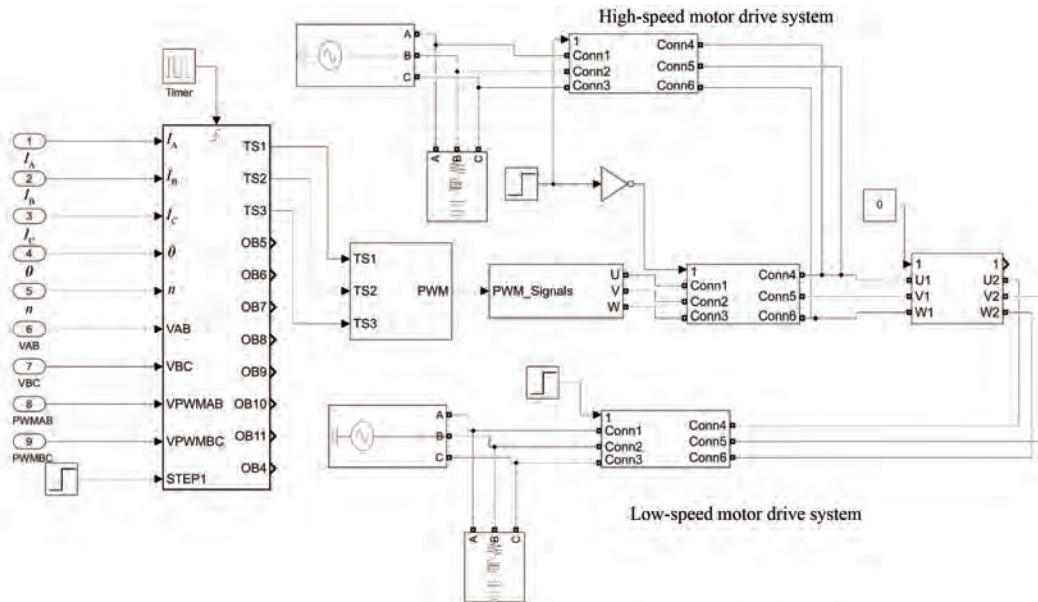


图3 变极电机切换控制仿真模型

Fig.3 Simulation model for switching control of pole-changing motor

3 变极电机工况切换过程分析及仿真

基于已完成的变极电机切换控制仿真模型,分别对变极电机高、低速相互切换的过程进行了分析,并对影响切换的关键因素进行了必要的仿真研究。

3.1 变极电机高切低过程分析及仿真研究

针对变极电机高切低过程,需要充分考虑以下3个相互制约因素的影响。

(1) 根据变极控制要求,变极电机高切低过程中,当断开高速电源后,应打开变极接触器,将电机定子绕组改为单星型接线型式,才可低速起动变极电机。

(2) 若低速起动前变极电机在较高转速运行,此时直接切换到低速,必然造成变极电机运行在不稳定域,最终导致低速绕组出现飞车、过电流等,因此应避免在低同步转速以上完成切换。

(3) 为避免剩余感应电动势的影响,在切换低速电源前,还应确保剩余感应电动势已降到较低水平,不会再对变极电机及外电网产生影响。

由于剩余感应电动势不易通过分析计算或台架试验方式进行直接测试,因此需要通过仿真对剩余感应电动势的影响进行分析。

3.1.1 变极电机高切低过程中剩余感应电动势的仿真分析

针对变极电机高切低过程中产生的剩余感应电动势进行了仿真分析,相应的转速、感应电动势变化曲线如图4所示。

由图4可知,变极电机高速停止后在自由停车过程中,900 ms以后变极电机绕组的剩余感应电动势已可忽略,而此时电机的转速仍远高于低速额定转速750 r/min,即当变极电机转速跌至低速同步转速时,剩余感应电动势已可忽略。

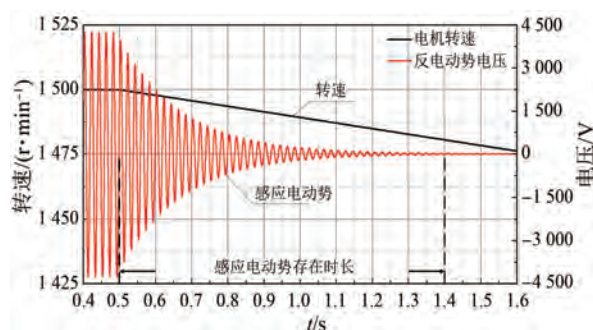


图 4 电机高切低过程中剩余感应电动势曲线

Fig. 4 Residual induced electromotive force curve during high-to-low speed of pole-changing motor

3.1.2 高切低控制策略

基于分析及仿真结论,从减小切换过程中的转速跌落、避免剩余感应电动势影响的角度出发,初步变极电机高切低的控制策略如图 5 所示。



图 5 变极电机高切低控制策略

Fig. 5 Control strategy for switching during high-to-low speed of pole-changing motor

同时,为提高切换过程的可靠性,避免因转速信号丢失导致整个切换过程失败,进一步引入了时间联锁机制。当超出阈值时间 2 s 时,将强制进行低速绕组的起动,以确保切换过程的实现。最终,基于变极+转速+延时联锁的变极电机高切低控制策略,如图 6 所示。

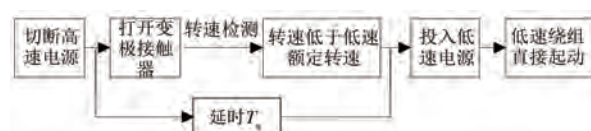


图 6 变极电机高切低控制策略

Fig. 6 Control strategy for switching during high-to-low speed of pole-changing motor

3.2 变极电机低切高过程分析及仿真研究

变极电机低切高过程由于切换前变极电机运行在较低转速条件下,其不存在切换瞬间出现电机转速高于高速工况同步转速的风险,但仍需要关注以下 3 个方面因素的影响。

(1) 根据变极控制要求,变极电机低切高过程中,当断开低速电源后,应闭合变极接触器,将电机定子绕组改为双星型接线型式,然后才可以起动变极电机高速。

(2) 为避免剩余感应电动势的影响,在起动变极电机高速前,应确保剩余感应电动势已降到较低水平,避免对变极电机及外电网产生影响。

(3) 为解决变极电机低切高过程中电机转速跌落问题,在满足上述 1、2 条要求的前提下,为减少电源切换过程中的电流冲击,还需要尽快完成锁频锁相环节^[24-26],并尽可能优化变极电机高速的变频起动过程,以期快速实现快速拉升变极电机转速,因此需要研究不同的变频起动控制方式对整个低切高过程的影响。

此外,还需要对剩余感应电动势、不同变频控制策略对变极电机低切高过程的影响进行仿真分析。

3.2.1 变极电机低切高过程中剩余感应电动势的仿真分析

对变极电机低速自由停车过程中产生的剩余感应电动势进行了仿真分析,相应的转速、感应电动势变化曲线如图 7 所示。

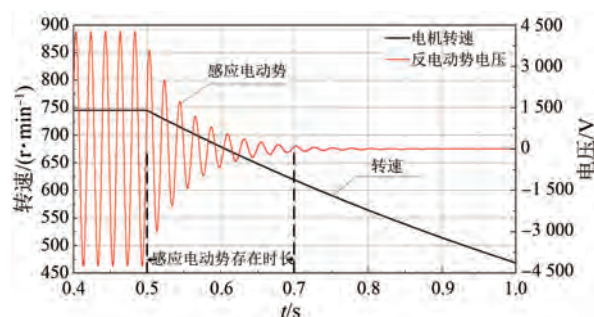


图 7 电机低切高过程中剩余感应电动势曲线

Fig. 7 Residual induced electromotive force curve during low-to-high speed of pole-changing motor

由图 7 可知,前 650 ms 内存在较高的感应电动势,在这段时间内若开始起动变极电机高速,剩余的感应电动势将会在高速绕组内部造成电压冲击并形成环流,很有可能会对绕组及电气一次部件绝缘造成损坏。因此,在变极电机低切高过程中,当低速停止后应避开在 650 ms 内起动变极电机高速。

3.2.2 不同变频起动控制对变极电机低切高过程影响的仿真分析

变极电机高速变频起动控制目前主要有 V/F 控制、矢量控制两种方式。为充分对比验证这两种控制策略的优劣,变极电机低切高高变频起动过程分别采用了 V/F 控制、矢量控制进行仿真

研究,相应的转速变化曲线如图 8 所示。

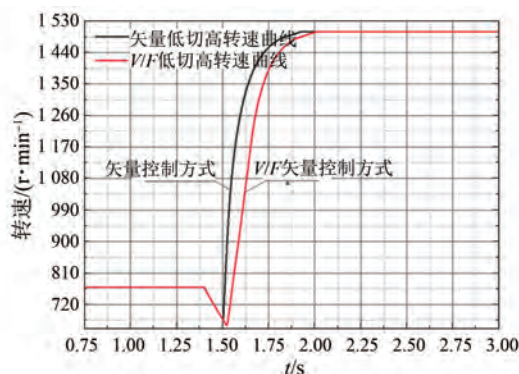


图 8 不同变频控制策略下的变极电机低切高过程中的转速曲线

Fig. 8 Speed curves of pole-changing motor during low-to-high speed with different frequency control strategies

通过仿真分析可以看出,和 V/F 控制相比,矢量控制较快地完成了锁频锁相环节,并可动态改变起动转矩,改善了变极电机高速的起动特性,迅速拉升转速,较好地避免了变极电机转速的大幅跌落。

3.2.3 电机高切低控制策略

综合上述分析及仿真结果,从避免剩余感应电动势的影响、减小切换过程中转速跌落的角度出发,最终提出基于变极+延时+矢量控制的变极电机低切高的控制策略,如图 9 所示。

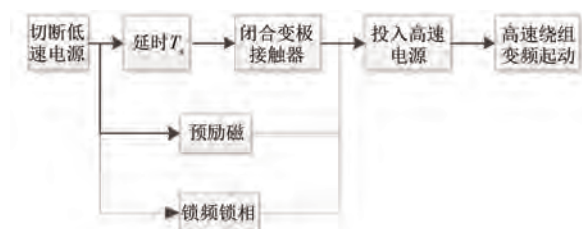


图 9 变极电机高切低控制策略

Fig. 9 Control Strategy for switching during low-to-high speed of pole-changing motor

4 试验验证

将变极电机高、低速相互切换的控制策略应用于后续的为泵电机配套的变频电源系统研制中,在台架试验中开展了变频电源系统与循环水泵的匹配性对接试验。循环水泵高速工况切换至低速工况试验,如图 10 所示。

由图 10 可知,电机转速由 1480 rpm 切换至 740 rpm 运行,切换过程中最低转速为 540 rpm,转

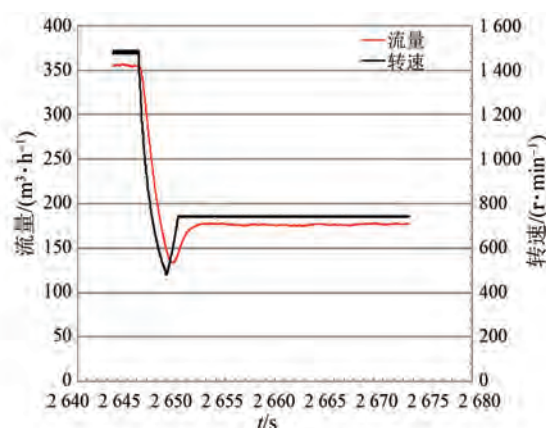


图 10 变极电机高切低过程中转速、流量曲线

Fig. 10 Speed and flow rate curves during high-to-low speed of pole-changing motor

速跌落幅度为 27%,整个转速跌落过程持续时间在 3.2 s 以内。试验过程中,回路流量由 $360 \text{ m}^3/\text{h}$ 切换至 $180 \text{ m}^3/\text{h}$ 运行,切换过程中台架水力回路最低流量为 $139 \text{ m}^3/\text{h}$,转速跌落幅度为 22.7%,流量跌落过程持续时间在 3.9 s 以内。

循环水泵低速工况切换至高速工况试验,如图 11 所示。

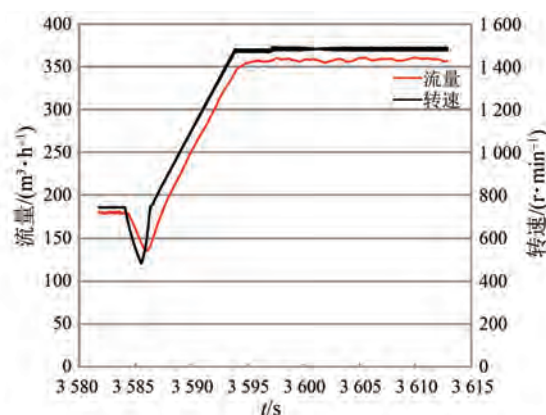


图 11 矢量控制下,变极电机低切高过程中转速、流量曲线

Fig. 11 Speed and flow rate curves during low-to-high speed of pole-changing motor with vector control

由图 11 可知,电机转速由 740 rpm 切换至 1480 rpm 运行,切换过程中最低转速为 552 rpm,转速跌落幅度为 25.4%,整个转速跌落过程持续时间在 1.7 s 内。试验过程中,回路流量由 $180 \text{ m}^3/\text{h}$ 切换至 $360 \text{ m}^3/\text{h}$ 运行,切换过程中台架水力回路最低流量为 $134 \text{ m}^3/\text{h}$,流量跌落幅度为 25.5%,整个流量跌落过程持续时间在 1.7 s 内。

试验数据表明,循环水泵的高速、低速工况切换过程中流量跌落幅度分别为 22.7% 和 25.5%, 流量跌落过程持续时间分别在 3.9 s 和 1.7 s 以内,远优于前序成熟工业变频器 68.9% 的跌落幅度及 7.5 s 的流量跌落持续时间。本文所提控制策略大大减少了工况切换过程中的流量跌落幅度,可满足台架工况切换过程中回路流质流量跌落幅度不大于 35% 的要求,较好实现了高低速工况之间的切换功能,也进一步验证并确认了已形成的变极电机切换控制策略的有效性。

5 结语

针对循环水泵变极电机高低速绕组切换过程中存在的问题,建立了变极电机切换仿真模型,分别重点分析研究了变极电机高切低、低切高过程,并对剩余感应电动势、变频控制策略等因素进行了仿真分析验证,最终形成了变极电机切换控制策略,并将该控制策略应用于配套的变频电源系统研制中。随后开展的台架试验验证了所提变极电机切换控制策略的有效性。该技术的成功突破,也为类似场合的变极电机工况快速切换提供了较好的指导思路。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

何亮进行了方案设计,高大朋进行了内容总结与论文撰写,骆攀、刘品超进行了仿真及实验研究,韩剑波、陈凯旋、周炳呈、刘堂胜、谢峰参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design was carried out by He Liang. The content summary and paper writing were carried out by Gao Dapeng. The experiment was conducted by Luo Pan and Liu Pinchao. The manuscript was revised by Han Jianbo, Chen Kaixuan, Zhou Bingcheng, Liu Tangsheng and Xie Feng. All authors have read and approved the final

version of the paper for submission.

参考文献

- [1] STEPHEN J C. 电机学(第五版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
STEPHEN J C. Electrical Engineering (5th Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [2] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2021.
GU C L, CHEN Q F, XIONG Y Q. Electrical Engineering [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2021.
- [3] DAJAKU G, BACHHEIBL F, PATZAK A, et al. Intelligent stator cage winding for automotive traction electric machines [C] // EVS28 International Electric Vehicle Symposium & Exhibition, 2015.
- [4] KUME T, SWAMY M. A quick transition electronic winding changeover technique for extended speed ranges [C] // 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, 2004.
- [5] YANG J, YIN R, ZHANG X, et al. Exponential response electrical pole-changing method for a five-phase induction machine with a current sliding mode control strategy [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(8): 1151-1159.
- [6] 戚叶龙, 徐余法, 孙明伦, 等. 基于统一设计法的单绕组双速异步电机绕组设计方案研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(8): 65-69.
QI Y L, XU Y F, SUN M L, et al. Winding design scheme of single-winding double-speed asynchronous motor based on unified design method [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(8): 65-69.
- [7] 王帅, 解伟, 林晓刚, 等. 基于矢量控制的定子笼型十二相感应电机极对数切换策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(8): 1-7.
WANG S, XIE W, LIN X G, et al. Pole-pair switching strategy of stator cage twelve-phase induction motor based on vector control [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(8): 1-7.
- [8] 陈礼, 甘醇, 吴建华. 开关磁阻变档电机机器绕组切换控制策略[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(3): 22-31.
CHEN L, GAN C, WU J H. Gear variable switched

- reluctance motors and winding changeover strategy [J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(3): 22-31.
- [9] CHEN C D, CHENG M Y, TSAI M S. Study on a wide speed range integrated electrical transmission system [C]//International Conference on Power Electronics and Drives Systems, Kuala Lumpur, 2005.
- [10] JIANG S Z, CHAU K T, CHAN C C. Spectral analysis of a new six-phase pole-changing induction motor drive for electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2003, 50(1): 123-131.
- [11] KELLY J W, STRANGES E G. Torque control during pole-changing transition of a 3:1 pole induction machine [C]//Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, 2007.
- [12] 杨家强, 高健, 黄进. 多相感应电机指数响应电子变极方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(27): 105-111.
- YANG J Q, GAO J, HUANG J. Electronic pole-changing methods of multiphase induction motors based on exponent response [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(27): 105-111.
- [13] 钱罗奋. 一种新的交流电机换相变极法- $2\Delta/3\Delta$ 变极[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(3): 120-125.
- QIAN L F. A new commutating method for change pole to electric machine $2\Delta/3\Delta$ change-pole [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(3): 120-125.
- [14] 田蒙蒙, 王秀和, 李昌. 新型 6/8 变极起动永磁同步电动机绕组切换动态过程的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(3): 909-917.
- TIAN M M, WANG X H, LI C. Research on the dynamic process of winding switching for a novel 6/8 pole changing line-start permanent magnet synchronous motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(3): 909-917.
- [15] 邢印. 大功率多相变频驱动系统设计[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(8): 82-86.
- XING Y. Development of high-power multiphase variable frequency drive system [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(8): 82-86.
- [16] 周桂珍, 张立飞. 异步电动机的 SPWM 变频调速仿真研究[J]. *机电信息*, 2015, (24): 104-106.
- ZHOU G Z, ZHANG L F. Simulation study on SPWM variable frequency speed regulation of induction motors [J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2015, (24): 104-106.
- [17] 杨晓楠. 多相电机的建模与控制 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- YANG X N. Modeling and field-oriented control of multiphase induction motor [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [18] 徐磊, 邓建国, 宋冰. 基于 MATLAB 五相感应电机仿真研究[J]. *微计算机信息*, 2009, 25(4): 199-200.
- XU L, DENG J G, SONG B. Modeling and simulation of five-phase induction motor [J]. *Microcomputer Information*, 2009, 25(4): 199-200.
- [19] 王宏. 异步电动机矢量控制变频调速系统给的建模与仿真研究[J]. *沈阳工程学院学报(自然科学版)*, 2017, 13(4): 353-356.
- WANG H. Modeling and simulation of vector control variable-frequency speed control system of asynchronous motor [J]. *Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science)*, 2017, 13(4): 353-356.
- [20] 赛东, 朱阔, 雷曙遥, 等. 一种基于离散变频的三相异步电机软启动控制[J]. *自动化应用*, 2024, 65(2): 46-50.
- SAI D, ZHU K, LEI S Y, et al. Soft start control of three-phase asynchronous motor based on discrete frequency conversion [J]. *Automation Application*, 2024, 65(2): 46-50.
- [21] 任明洋, 骆皓, 朱坤硕, 等. 基于空间极对数宽频带耦合的双转子同步风力发电机电磁特性分析[J]. *电机与控制应用*, 2024, 11(10): 85-90.
- REN M Y, LUO H, ZHU K S, et al. Electromagnetic characteristics analysis of dual-rotor synchronous wind generator based on wideband coupling of spatial pole pairs [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 11(10): 85-90.
- [22] 刘鑫, 青先国, 张宓, 等. 基于三电平矢量控制的变频驱动技术研究[J]. *核动力工程*, 2019, 40(增刊2): 108-111.
- LIU L, QING X G, ZHANG M, et al. Research on variable frequency drive technology based on three level vector control [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2019, 40(S2): 108-111.

- [23] 江宏玲, 周成, 戴新荣, 等. 基于 DSP 异步电动机矢量控制系统仿真与实验研究[J]. 电气传动, 2017, 47(6): 15-19.
JIANG H L, ZHOU C, DAI X R, et al. System simulation and experimental research based on DSP of asynchronous motor vector control [J]. Electric drive, 2017, 47(6): 15-19.
- [24] 张子才, 黄良沛, 龚争理. 三相异步电机切换过程的动态分析与系统仿真[J]. 电气传动, 2010, 40(12): 21-25.
ZHANG Z C, HUANG L P, GONG Z L. Three-phase asynchronous motor dynamic analysis and system simulation of switching process [J]. Electric Drive, 2010, 40(12): 21-25.
- [25] 郭晓娴, 谷继品, 朱皓, 等. 钠冷快堆一回路主循环泵在场外主辅电源切换工况下的运行特性研究[J]. 核动力工程, 2023, 44(1): 104-108.
GUO X X, GU J P, ZHU H, et al. Study on the operation characteristics of the primary main circulating pump of sodium-cooled fast reactor under the switching condition of off-site main and auxiliary power supplies [J]. Nuclear Power Engineering, 2023, 44(1): 104-108.
- [26] 阙超豪, 赵威, 储成龙, 等. 基于变极绕组的无刷双馈电机起动特性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(7): 1392-1403.
QUE C H, ZHAO W, CHU C L, et al. Research on starting characteristics of brushless doubly-fed machines based on pole changing winding [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(7): 1392-1403.

收稿日期:2025-03-26

收到修改稿日期:2025-05-06

作者简介:

高大朋(1985-),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力电子及电气控制,371299512@qq.com;

*通信作者:何亮(1982-),男,双学士,研究员级高级工程师,研究方向为仪表与控制、电力电子及电气控制,bulk3695@sina.com。