

炼钢转炉除尘风机双电源切换控制策略研究

梁泽毅

(上海梅山工业民用工程设计研究院有限公司, 上海 200093)

摘要: 炼钢转炉除尘风机系统是炼钢生产除尘系统的主要设备。为了保证该设备的正常运行,避免因供电异常带来的安全事故与经济损失,研究了一种转炉风机供配电系统双电源切换装置。分析了该转换装置的电压异常检测方法、转换时机的选择和触发控制策略,并基于 MATLAB/Simulink 进行了仿真,证明了备用电源与剩余感应电动势间的相位角差与动态切换策略的正确性。

关键词: 除尘风机; 双电源; 切换策略; 仿真

中图分类号: TM346 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)06-0024-05

doi: 10.12177/emca.2022.053

Study on Dual Power Supply Switching Strategy for Dusting Fan in Steelmaking Converter

LIANG Zeyi

(Shanghai Meishan Industrial Civil Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: The steelmaking converter dusting fan system is the main equipment of the steelmaking production dusting system. In order to ensure the normal operation of the equipment and avoid safety accidents and economic losses caused by abnormal power supply, a dual power supply switching device for the converter fan power supply and distribution system is proposed. The voltage abnormality detection method, switching timing selection and triggering control strategy of the switching device are analyzed. A simulation example based on MATLAB/Simulink proves the correctness of the phase angle difference between the standby power supply and the residual induced electromotive force and the dynamic switching strategy.

Key words: dusting fan; dual power supply; switching strategy; simulation

0 引言

转炉风机是炼钢设备除尘过程中的重要辅机,主要功能是将灰尘和有害气体吹入除尘设备进行净化。风机提供的动力是转炉炼钢设备除尘系统正常运行的主要动力,风机一旦供电异常,除尘过程受到破坏,可能造成意外停产、污染环境、危害操作人员等严重后果。因此保证转炉风机的供电可靠性至关重要。转炉风机系统一般采用主/备用电源的双电源供电模式,在电网系统波动或是配电系统异常时,快速切换供电电源,且在切

换过程中需要避免出现过压、过流问题。尤其是转炉风机系统一般使用较大容量电动机,在供电切换过程中电机产生的感应电动势会在定子中感应出瞬间高强度冲击电压、形成电流尖峰,危及电力线路保护装置,很可能引起跳闸导致重新失电^[1-2]。交流电机在电压切换过程中,由于转子惯性,转速不会迅速到零,此时在定子绕组中感应出电动势,即感应电机剩余感应电动势,对剩余感应电动势产生机理的研究是抑制合闸冲击电流的基础。文献[3-8]讨论了失电后电机的电磁转换过程与三相定子电流方程,对重合闸的最不利时机做

收稿日期: 2022-05-15; 收到修改稿日期: 2022-05-30

作者简介: 梁泽毅(1991—),男,学士,助理工程师,研究方向为计算机控制技术及其在冶金行业环境保护工程市场化中的应用。

出分析,用空间矢量方法推导出剩余感应电动势表达式,并讨论了切换成功的关键因素。对电压暂态特征的提取与准确快速的识别,是快速有效地进行电源切换时机判断的基础。为了及时检测出电压暂降的起始时刻与相角变化,常使用的方法可分为时域检测法^[9]与变换域检测法^[10-13]。基于时域检测法,本文提出了一种优化单相 $d-q$ 变换算法对电压暂降进行快速检测的方法,实时检测电压暂态特征,并研究了感应电机在定子断电后的剩余感应电动势对电机产生电流冲击的机理,判断电机运行状态。采用优化单相 $d-q$ 变换算法判断电压暂降,控制晶闸管动作时刻,实现双电源之间安全、稳定的切换,保证转炉风机的供电安全。在理论分析的基础上设计了一种采用数字信号处理器(DSP)的转炉风机双电源快速切换供电装置,通过实时并适时地控制晶闸管的通断时刻,减小切换合闸时的电流电压冲击,确保供电可靠性。

1 电源快速切换机理

本文研究的基于晶闸管的快速切换电路拓扑如图1所示,该拓扑主要由断路器 KM1、KM2,三相反并联晶闸管组 SCRs1、SCRs2 等组成。断路器 KM1 和 KM2 具有互锁功能,晶闸管组 SCRs1 和 SCRs2 也具有类似的互锁功能。起动过程中对晶闸管组 SCRs1 进行控制,实现电机软起动;正常工作时,闭合 KM1,电机由主电源供电。当检测到主电源异常时,向 SCRs1 发出驱动信号,使其工作,然后断开 KM1,由于 SCRs1 已经导通, KM1 触点两端被 SCRs1 箝位,其关断过程不会出现电弧。当 KM1 关断后,移除 SCRs1 的触发信号,晶闸管自然过零关断。同时,检测备用电源的状态信息和感应电机的反电动势信息,适时向 SCRs2 发出驱动信号,电机由主电源供电切换到备用电源供电。最后再闭合 KM2,断开 SCRs2 的驱动信号,完成由主电源向备用电源切换。由于 KM1 与 KM2 之间设置互补控制信号,避免了 KM1 与 KM2 同时闭合导致的电压冲击。

理论分析表明,确保无冲击电流状态下实现电源快速切换的时机可以采用备用电源与电机感应电动势的相角差为切换依据。切换模式可以分为快速切换、同期捕捉切换和剩余感应电动势切换等三种,如图2所示。快速切换模式为当主电

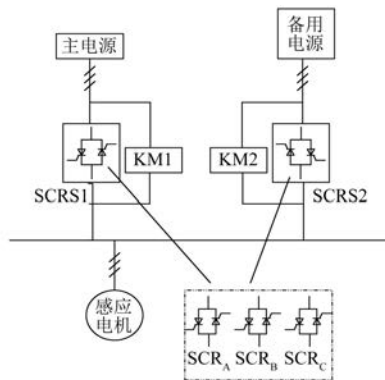


图1 基于晶闸管的快速开关拓扑

源发生故障时,若主、备电源相角差别不大,在较短时间内进行电源切换,这种切换方式既保证了较短的停电时间,对定子绕组造成的电压冲击也在允许范围内,如图2中区域1所示。如果主/备用电源之间相角相差较大,或者快速切换时机太短导致切换开关来不及运作,可以在相角差越过 180° 后再次重合时进行切换,也即同期捕捉切换模式,如图2中的区域2所示。若同期捕捉切换没有成功,就转入剩余感应电动势切换模式,如图2中的区域3所示,当剩余感应电动势衰减到20%~40%额定电压时,投入备用电源,实现电源切换。剩余感应电动势切换可保证切换过程不产生冲击电流,但电动机的断电时间相对较长。

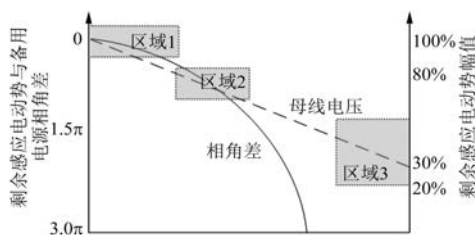


图2 剩余感应电动势与备用电源的角差和幅值示意图

为了保证切换过程的快速性,在可接受断电时间内完成电源切换,经过电压检测与相角检测后,尽量保证在快速切换或同期捕捉阶段切换到备用电源,在相角差较小时进行合闸可使负载承受的冲击电流较小,达到低电流冲击下快速切换电源的效果。快速切换模式和同期捕捉切换模式的实现严重依赖于双路电源的频率和相位差均较小,否则将产生较大的冲击电流,产生严重后果。实际工程应用中,主/备供电电源的频率差和相位差是随机的,快速检测电动机的剩余感应电动势

是确保可靠进行主/备供电电源切换的必要手段。

2 感应电机剩余感应电动势分析

在进行电源切换时,由于电机转子的惯性,转子的转速不会立刻降到零,此时感应电机为发电机模式,产生反电动势,即为剩余感应电动势。惯性大的电机剩余感应电动势衰减时间可延续至 3 s 以上,而现代社会对切换速度的要求越来越高,常需要在剩余感应电动势存在的情况下实现快速电源切换。研究电机剩余感应电动势的产生机理对电源切换时产生冲击电压的瞬态分析有重要意义。

采用空间矢量法可简化感应电机模型的建立。电压与定子磁链的表达式为

$$u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (1)$$

$$u_r = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} \quad (2)$$

$$\psi_s = L_s i_s + M_m i_r' \quad (3)$$

$$\psi_r' = M_m i_s + L_r i_r' \quad (4)$$

式中: u_s 、 i_s 、 ψ_s 为定子侧电压、电流与磁链; i_r 、 ψ_r 为转子电流和转子磁链; ψ_r' 、 i_r' 为折算到定子侧的转子磁链和转子电流; M_m 为电动机互感系数; R_s 、 L_s 分别为定子每相绕组的电阻和总电感; R_r 、 L_r 分别为归算到定子侧的转子每相绕组的电阻和总电感; u_r 为转子侧电压。

在某一时刻断开三相定子电源,由式(1)~式(4)可得:

$$u_r = R_r i_r + L_r \frac{di_r}{dt} + \frac{dL_r}{dt} i_r = 0 \quad (5)$$

此时由于电机是感性负载,转子电流不会突变,可由式(2)得到断电前一时刻转子电流初始值 I_{r0} ,折算到定子侧可得断电后转子电流为

$$i_r' = i_r e^{j\theta} = I_{r0} e^{-\frac{t-t_0}{T_r}} e^{j\theta} \quad (6)$$

式中: $T_r = \frac{L_r}{R_r}$; t_0 为断电时刻; θ 为 t 时刻定子电压与转子电压的相角差, $\theta = \omega_r t + \theta_0$, θ_0 为转子与定子电压断电时夹角。

假定断电时间较短,转子转速在剩余感应电动势衰减过程中保持不变,则有:

$$u_s = \frac{d\psi_s}{dt} \quad (7)$$

由式(1)~式(7)可得:

$$\frac{d\psi_s}{dt} = \left(L_s - \frac{M_m^2}{L_r} \right) \frac{di_s}{dt} + j\omega_r \frac{M_m^2}{L_r} i_s + \left(j\omega_r - \frac{1}{T_r} \right) M_m i_r' \quad (8)$$

最终剩余感应电动势表达式为

$$u_s = M_m I_{r0} e^{-\frac{t-t_0}{T_r}} \left(j\omega_r - \frac{1}{T_r} \right) e^{j\theta} \quad (9)$$

由式(9)可知,剩余感应电动势幅值由转子电流与转子转速决定,其衰减的幅度与转子时间常数 T_r 相关, T_r 越大剩余感应电动势衰减得越慢,当剩余感应电动势未衰减到零时接入备用电源产生电压差,剩余感应电动势与备用电源之间的相角差越大,在装置中产生的电压冲击就越大。图3为不同相位差下,产生冲击电压的大小。 e_s 为转子旋转时在定子上感应出的剩余感应电动势, u_{sp} 为接入的备用电源电压,可知随着相位差的变大,电压差幅值增大,在相位差达到 180° 时幅值达到最大,因此在合闸时应尽量选择相位接近的时刻。比如,当备用电源与剩余感应电动势之间的相角差较大时,需要等待相角差越过 180° 再次接近时进行电源切换,即为同期捕获切换。

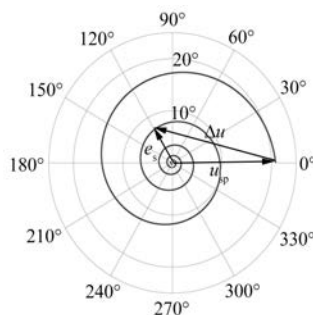


图3 接入备用电源后电压差示意图

3 动态电压检测

为了实现主电源电压波动时快速切换电源,保障用电设备的安全,对电网电压及电机感应电动势的动态变化进行及时、快速的检测非常重要,其影响整个系统对电源故障的反应速度。为了节省数字信号处理器(DSP)中的AD检测接口,采用优化单相 $d-q$ 变换算法进行交流电压暂态检测,该方法检测速度快,在获得电压实时变化的同时可以得到相位跳变信息,兼具实时性与鲁棒性。

设采样得到的 a 相电压信号为

$$u_a = \sqrt{2}U\cos(\omega t + \varphi) \quad (10)$$

式中: u_a 为 a 相电压; ω 为电压角频率; φ 为 a 相初始相角; U 为相电压有效值。

将 u_a 延时可以获得 c、b 相电压 u_c 、 u_b :

$$\begin{aligned} u_c = & -\sqrt{2}U\sin\left(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{3}\right) = \\ & -\sqrt{2}U\sin(\omega t + \varphi)\cos\frac{\pi}{3} + \\ & \sqrt{2}U\cos(\omega t + \varphi)\sin\frac{\pi}{3} \end{aligned} \quad (11)$$

$$u_b = -u_a - u_c \quad (12)$$

将 u_a 延时 σ 角度得到电压 u_σ 为

$$\begin{aligned} u_\sigma = & \sqrt{2}U\sin(\omega t + \varphi - \sigma) = \\ & u_a\cos\sigma - \sqrt{2}U\cos(\omega t + \varphi)\sin\sigma \end{aligned} \quad (13)$$

由式(13)可得:

$$\sqrt{2}U\cos(\omega t + \varphi) = \frac{u_a\cos\sigma - u_\sigma}{\sin\sigma} \quad (14)$$

将式(14)代入式(11)与式(12)中,可得 b、c 相电压表达式:

$$u_b = -\frac{1}{2}u_a - \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{u_a\cos\sigma - u_\sigma}{\sin\sigma} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} u_c = & -\sqrt{2}U\sin\left(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{3}\right) = \\ & -\sqrt{2} - \frac{1}{2}u_a + \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{u_a\cos\sigma - u_\sigma}{\sin\sigma} \end{aligned} \quad (16)$$

将经过延时处理得到的三相电压进行 Park 变换得到其在 d - q 坐标系的电压:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} &= C \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \\ C &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\omega t & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\omega t & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

将式(10)、式(15)、式(16)、式(18)代入式(17)可得到在 d - q 坐标系的电压:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{\sin\sigma} \begin{bmatrix} -\sin(\omega t - \sigma) & \sin\omega t \\ -\cos(\omega t - \sigma) & \cos\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_\sigma \end{bmatrix} \quad (19)$$

由式(19)可以得到基波电压的幅值与相角跳变值为

$$\begin{cases} U = \frac{\sqrt{3}}{3}\sqrt{u_d^2 + u_q^2} \\ \varphi = \arctan \frac{u_q}{u_d} \end{cases} \quad (20)$$

通过对采样得到的单相电压进行优化单相 d - q 变换,由式(20)可计算出被检测电源电压的幅值与相位的实时变化,为实时准确地进行电源切换奠定基础。需要注意的是,对于 σ 的取值需要在对程序延时要求与硬件噪声进行综合考虑后选取。

在对快速电源切换系统的理论分析的基础上,研制了新型快速电源切换装置的控制系统,其组成如图4所示。系统的主控芯片采用 TI 公司的 TMS320F28335 DSP。对 A 路(主电源)、B 路(备用电源)和交流电机的输入电压电流通过信号调理电路后采样进 DSP,使用优化单相 d - q 变换算法对电压幅值与相位进行实时检测,根据电压的实时状态选择适当切换时机后发送 SCR 驱动信号,完成主/备用电源之间的快速可靠切换。保护电路及报警与显示单元等对电源切换系统运行状态进行实时监测,既参与对系统的保护,也经由 CAN 通信与系统上位机进行信息交互,实时发送运行状态信息。在本文所研究的控制策略支撑下,实现转炉风机的高可靠性供电。

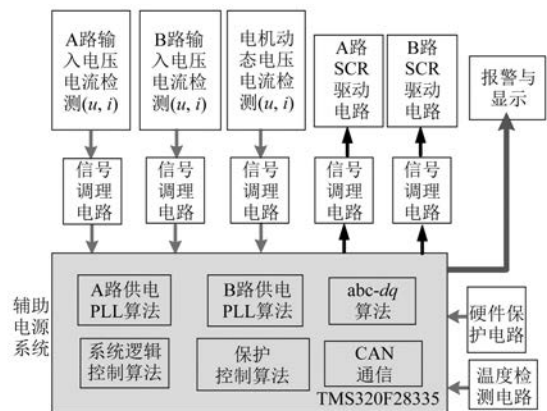


图4 控制系统组成框图

4 仿真结果

在进行理论分析的基础上,基于 MATLAB/Simulink 进行了仿真测试,设置晶闸管脉冲宽度为

100°,选择六脉冲驱动方式控制晶闸管,在仿真模型中选择 2.2 kW 鼠笼型感应电机,额定电流 4.8 A,带风机负载,假设在 0.3 s 时出现电压暂降。当备用电源与剩余感应电动势相位相差 20°,直接切换时定子电流波形如图 5 所示,此时冲击电流最高为额定电流的 3 倍,且在 0.3~0.35 s 之间波动较小,50 ms 后系统可以正常工作。由仿真数据可得,在相角差为 30°以内时直接切换对系统带来的冲击是可以接受的,在此相角差范围内无需判断相角差最小时刻,可以直接切换电源。

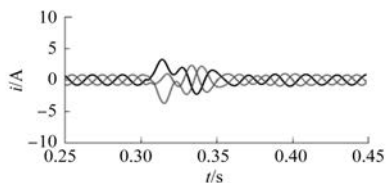


图 5 掉电时相角差 20°时直接切换三相定子电流波形

当备用电源与剩余感应电动势相角差为 100°时直接切换电源,对系统的冲击如图 6 所示,造成的冲击电流高达额定电流 10 倍以上,对系统冲击较大,应等待至同期捕获时期再进行电源切换。图 7 所示为电机断电 60 ms 后,在备用电源与剩余感应电动势之间的相角差再次重合时,进行电源切换,此时最高冲击电流较小。图 8 中波形为备用电源与剩余感应电动势之间的相角差达到 180°时进行电源切换的三相定子电流波形,在该时刻进行电源切换,造成了最大的电压冲击,与理论分析一致,该冲击电压下有设备损坏的风险。

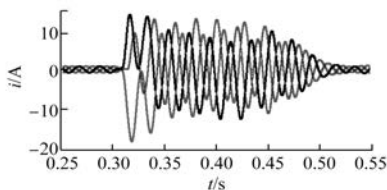


图 6 掉电时刻相角差 100°时直接切换电源三相定子电流波形

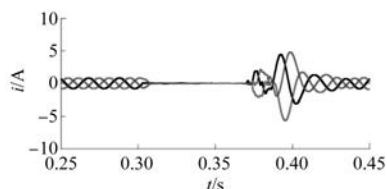


图 7 掉电时相角差 100°时同期捕获切换三相定子电流波形

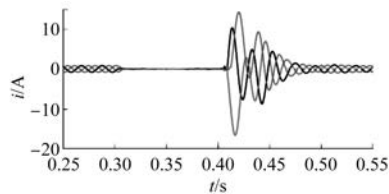


图 8 掉电时相角差 180°时切换电源三相定子电流波形

5 结 语

本文设计了一种转炉风机双电源切换装置。通过对剩余感应电动势形成机理进行建模分析,将备用电源与剩余感应电动势相位差作为自动切换时机的判断依据。对系统进行仿真分析可知,在备用电源与剩余感应电动势之间相差 30°以内时可以驱动晶闸管进行快速切换,在备用电源与剩余感应电动势之间的相角差较大时,使用同期捕获切换的方式可以大幅度减小冲击电流,保护快切装置与设备。仿真结果表明了本文所提出的控制策略和控制方案的正确性和可行性,研究成果具有较大工程应用价值。

【参考文献】

- [1] SILLAPAWICHARN Y. An improvement of a fast single-phase voltage sag detection method under distorted grid voltages [C] // 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2016.
- [2] 冯小兰,李杰,苗世华,等. 新型电源快速切换装置在工业企业变电站的应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 31(4): 15.
- [3] 汤晓燕. 三相感应电动机瞬间断电重新投入电网时的瞬态[J]. 电机与控制学报, 2001, 5(2): 98.
- [4] WOULDSTRA J B, DELEROI W. Reswitching of an induction motor with remainder flux [C] // Third International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives, 1988.
- [5] 高吉增,杨玉磊,崔学深. 感应电动机失电残压的研究及其对重合过程的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 45.
- [6] 李和明,张自力,崔学深,等. 晶闸管-电动机系统不对称瞬态建模及解析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 241.

(下转第 91 页)