

首钢高炉电动鼓风机变频启动装置的分析与研究

张耀松

(首钢新钢动力厂,北京 100041)

【摘要】 高炉电动鼓风机由同步电机拖动,电动机容量较大,为避免对电网造成冲击,采用变频启动,变频启动装置为电动鼓风机的核心设备。以首钢电动鼓风机为例,介绍了系统的构成,对变频启动调速装置的结构、控制原理和方法以及启动、加速、并网的全过程进行了分析和研究。

【关键词】 同步电机;变频启动;控制

1 概述

高炉鼓风机是冶炼过程中的关键设备,直接影响着高炉冶炼能否正常进行。七十年代以前,高炉鼓风机均采用汽轮机拖动,功率受到了限制。为了提高生产率,钢铁企业的设备越来越趋向大型化,高炉大型化带来能源的节约与效率的提高,使高炉利用系数提高,焦比降低。而高炉大型化伴随高压操作技术的应用,必须具备与相匹配的大型高压轴流鼓风机,以取代过去的蒸汽透平机,以提高操作效率。但过去由于同步电动机的自启动能力小,需要有庞大的启动设备而限制了大容量同步电动机的使用。七、八十年代以来,随着可控硅元件的高压、大容量制造技术的发展,应用可控硅变频装置,使同步电动机可以从静止启动到工频速度,解决了启动问题,使用数字交-直-交变频软启动器启动高炉鼓风机的同步电动机并将其投入到电网运行,逐渐被世界上很多大型钢铁企业应用。

同步电动机不仅运行稳定、恒速、具有较大的硬特性,而且可以通过调节励磁电流而改变功率因数,对感性负载的电网进行有效的补偿,但其变频器和控制系统技术比较先进和复杂。在七十年代末 BBC 公司开发了大功率变频器作为变流电源,由电子模拟装置控制软启动设备。到了九十年代,控制系统升级为计算机控制,许多技术有了进一步的完善和提高。在这一领域,德国西门子的 SIMADYN D 全数字交直交变频启动技术比较具代表性。

可控硅变频启动装置的特点可归纳为:

(1)通过调节整流器输出的直流电压且用自控式逆变方式,可以使同步电动机始终在同步状

态下近于线性的启动加速。

(2)电动机在同步状态并入电网,因而对系统电网不存在冲击。

(3)属静止启动装置,维护检修方便。

(4)启动加速功率消耗小。

(5)可以用一套启动装置顺次启动多同步电动机,大幅度节省投资

(6)消耗冷却水和一次能源少。

(7)可控硅装置可以把换流的角控制在所需最小值,使电机在高效率、高功率因数下启动加速,启动时间短。

首钢结合四、三、一高炉大修增容改造从 1992 年开始安装了 4[#]、5[#]、6[#] 电动鼓风机,替代了汽轮鼓风机,2000 年安装了 7[#] 电动风机。鼓风机为全静叶可调式风量为 7000m³/min, (6[#] 机 6000m³/min),同步电动机功率全部为 36140kW,额定电压 10.5kV,额定电流 2379A,转速 3000r/min。4[#] 风机安装一套 BBC 变频启动装置,5[#]、6[#] 风机公用一套西门子制造变频器,7[#] 机安装一套西门子技术首钢电子公司制造的变频器,这两台变频器的控制设备为西门子公司制造计算机控制。

2 系统构成

电动机启动装置由变频变压器、整流可控硅、逆变可控硅、可控硅光触发控制器、主回路及数字逻辑控制调整、励磁控制、并网装置等组成。变频器由 SIMADYN.D 可编程进行电机的启动、加速、自动整定和并网控制。控制系统采用无换向器直流机原理及无刷励磁、无传感器定位测速等技术。运行励磁系统采用的 SIMADYN.D 可编程控制。主回路由励磁调整装置(SIMOREG.K)、过流保护由若干接口实现启动励磁、工作励磁功能。

电动机采用恒流变频启动方式,启动时转子通入励磁电流,定子由变频装置提供变频电源,变频电源的频率由 0.5Hz 逐渐升高到 50Hz,电压逐

渐升高到电机额定电压,电机的转速随频率同步地升高到额定值 3000r/min。

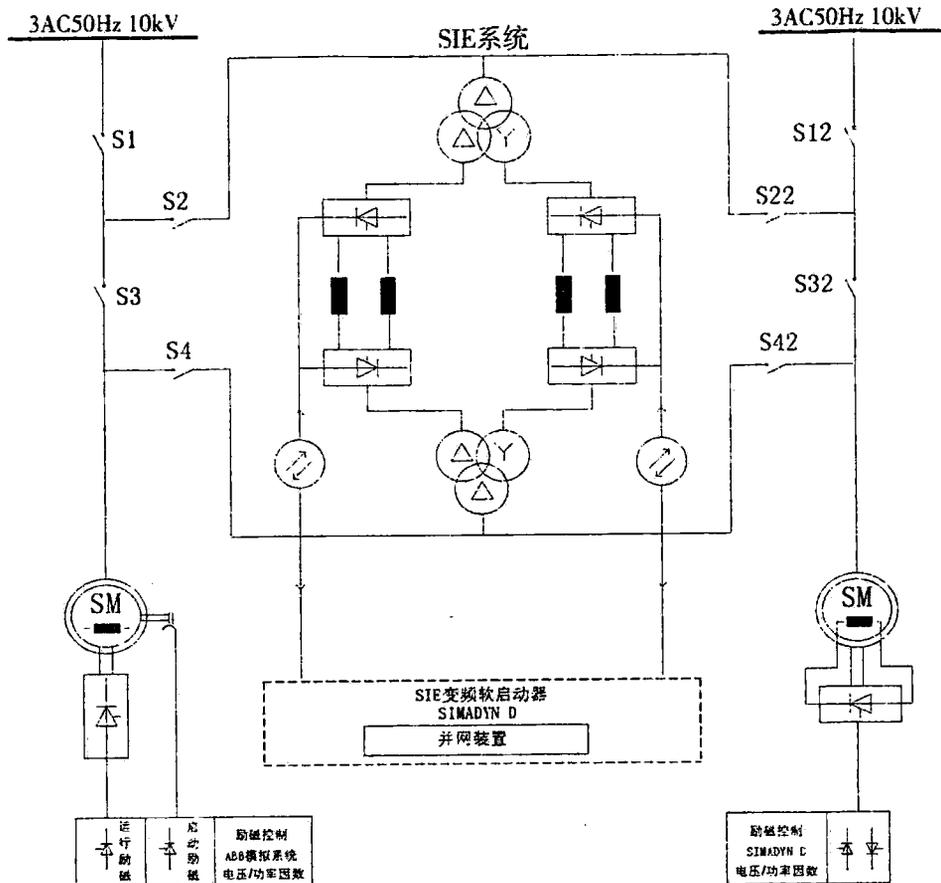


图 1 系统的基本构成

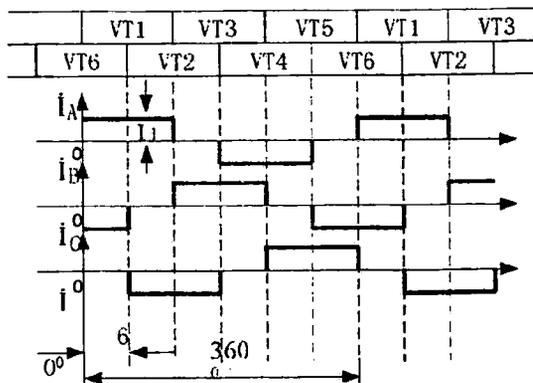
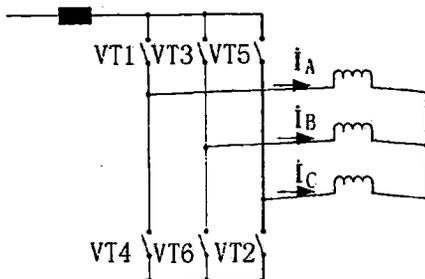


图 2 逆变器输出电流波形

逆变器的输出为三相交流矩形波(见图 2),各相之间互差 120°,由给定信号来改变频率发生器的振荡频率大小。从而改变逆变器输出的交流电压的频率。为了解决调节系统的低电压和主回路部分的高电压(10kV)的隔离问题,本装置采用光电管组成的间接光电耦合式触发系统,可控硅触发脉冲的传输采取“电-光-电”的方式进行,既由控制回路中产生的可控硅触发脉冲电信号驱动发光二极管,光导纤维组的光导管将光脉冲传输到设置在高电位部分的脉冲放大单元中,经光电转换和电脉冲信号放大之后触发可控硅元件。

2.1 电流型变频器的多重化技术

本装置采用电源两重化技术,系统的主回路采用两套交-直-交电流型变频器,组成 12 脉冲的变频器。变频变压器为三卷线圈,接线方式为 Δ/ΔY(见图 3),两套变频器输出波形相差 30°电角度,叠加以后合成两级阶梯波,属耦合性输出,合成后的电流波形如图 4。

由图 4, 可看出两组变频器经变压器耦合后, 输出电流 I_R 波型变为多级阶梯波, 减少了高次谐波电流成分, 抑制电动机转矩的脉动, 且能消除低速转矩脉动, 提高转矩脉动频率, 防止机械共振, 消减谐波附加损耗, 减少了换流功率。

2.2 电动机的合成磁势

逆变器可控硅按顺序导通时电流在定子中产

生合成磁场。

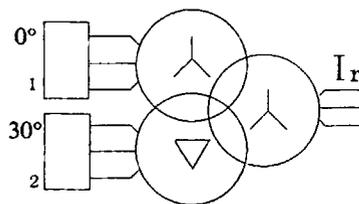


图 3 接线方式

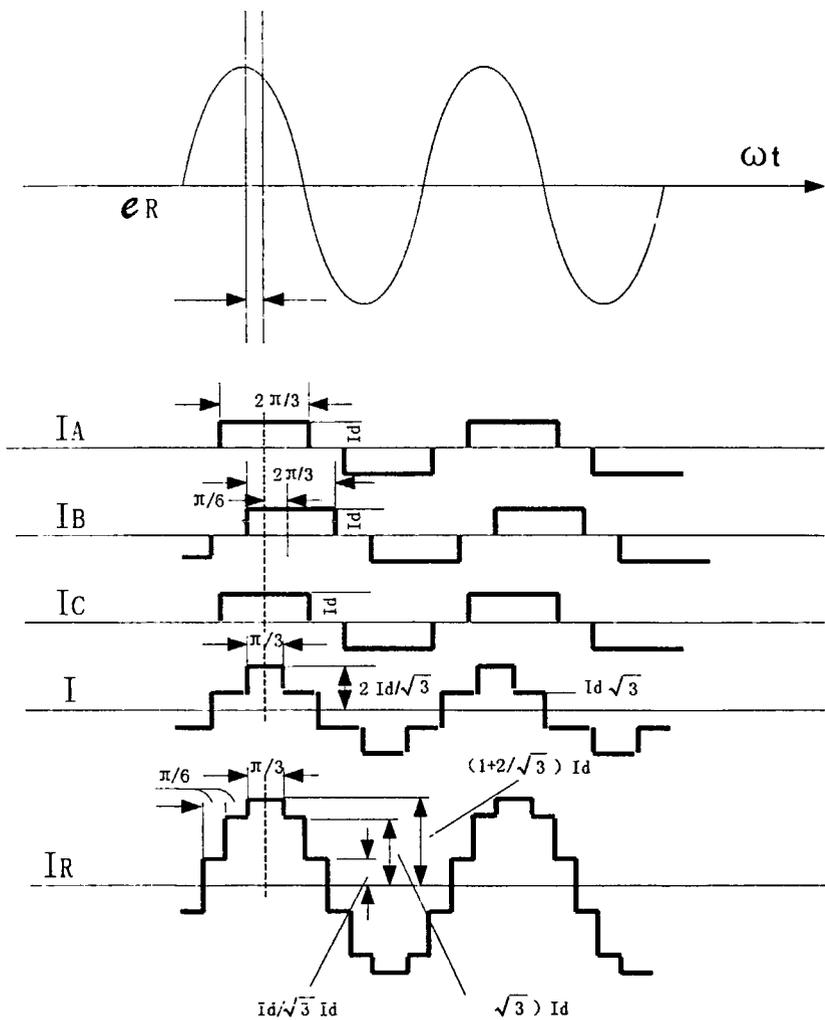


图 4 消除特定高次谐波的二重化电流型变频器各部分电流波形

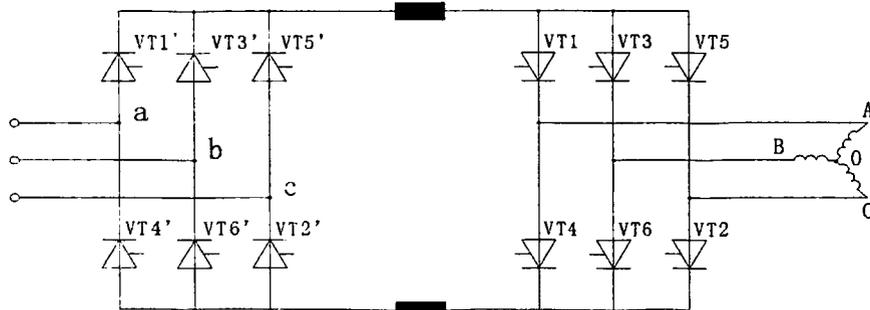


图 5 变频装置

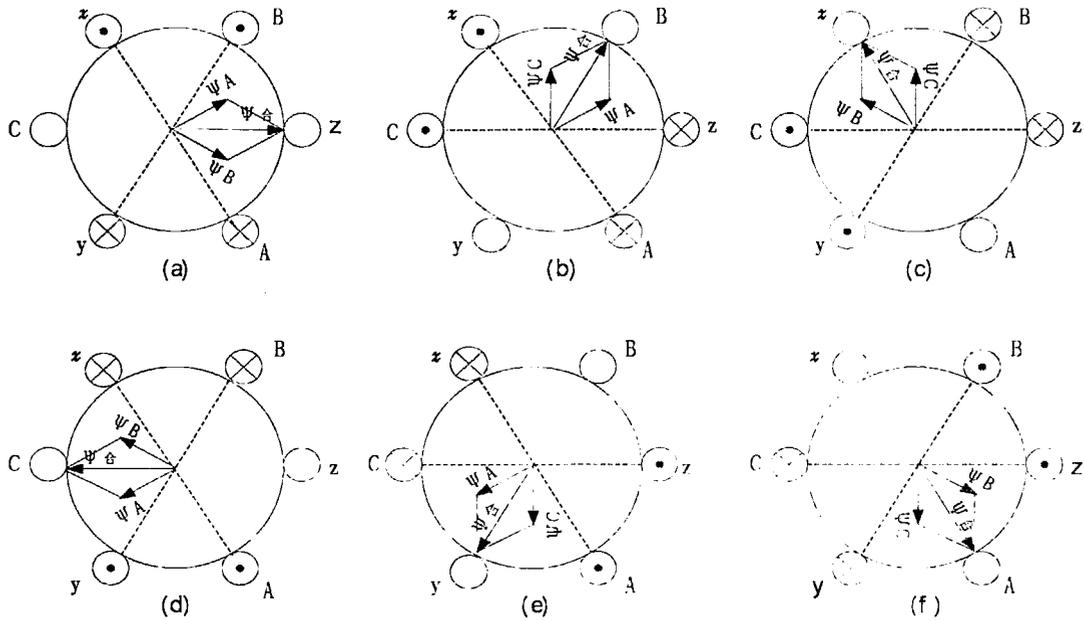


图6 电动势合成

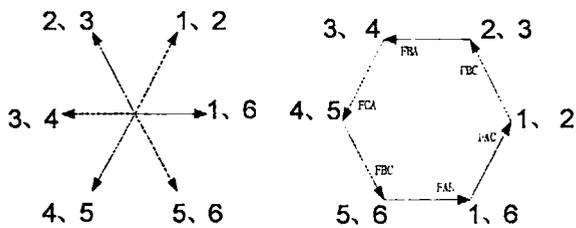


图7 合成磁场

见图 6.a 当 VT1, VT6 导通时, 电流经 P→VT1

→电机 A 相进 X 出, B 相 Y 进 B 出, →VT6→N。A 相电流在定子中产生磁势 Ψ_A , B 相电流在定子中产生磁势 Ψ_B , 其合成磁势为 Ψ 。

图 7 标出可控硅 VT1, VT6→VT1, VT2→VT2, VT3→VT3, VT4→VT4, VT5→VT5, VT6 依次导通时电流在电机定子中产生的合成磁场 F_a , 由此可看出电机转过 60° 电角度可控硅需换向一次。按以上可控硅导通顺序定子中合成磁场逆时针旋转。

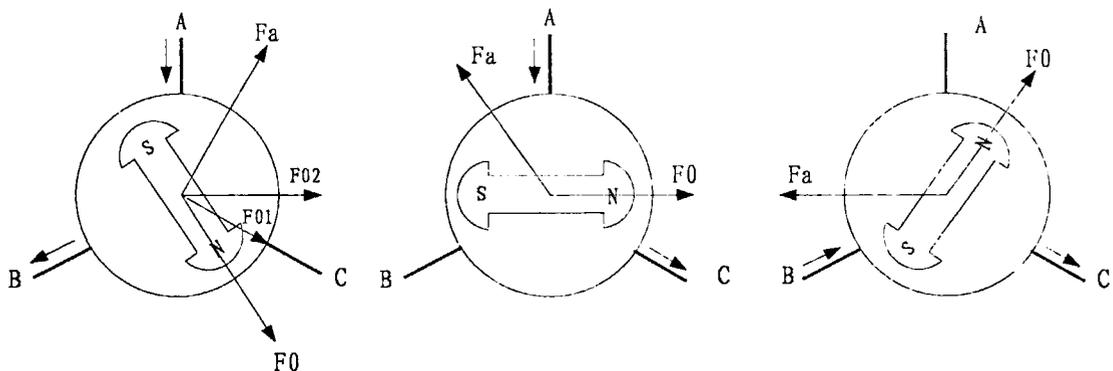


图8 转子位置对磁场的影响

电机转子接通电流产生转子励磁磁场 F_0 , 设起动时电动机转子处于图 8(1) 位置。这时 VT1 和 VT6 导通, 电流方向为 VT1→电机 A 相绕组→B 相绕组→VT6。定子产生合成磁势 F_a , 其方向指向垂直于 C 相轴线位置, (当定子绕组中只有两相通电时, 其合成磁场 F_a 指向未通电相轴线的垂直位置)。定子磁场与转子励磁磁场之间相差 120° , 两磁场相互作用, 使同步机旋转。当磁极转过 30° , 即励磁磁场在 F_{01} 位置时, F_a 与 F_{01} 相位

角 90° , 电动机产生最大转矩。当磁极继续转到 F_{02} 位置时, F_{02} 与 F_a 相差 60° , 电机转矩减小, 控制逆变器可控硅进行换向, 定子合成磁场 F_a 步进 60° 电角度, F_a 与 F_0 之间仍恢复到 120° , 如此循环下去。两磁场之间的相位角始终保持在 $60 \sim 120^\circ$ 范围内, 从而使同步电动机维持一定转矩稳定运转。如果在 VT1 与 VT6 导通后 60° 时刻电流不换向, 仍是 VT1 和 VT6 导通, 那末 F_a 与 F_0 之间的相角差将会小于 60° , 转矩将会下降, 电机甚至会失

步。因此转子每转过 60° 就必须重新触发和关断相应的可控硅,以对电动机进行定子绕组切换,改变定子磁场,从而保证定子磁场与转子磁场之间始终同步的关系。电机在启动过程中,随着逆变器的换向,电机励磁磁场滞后于定子旋转磁场,保持在 $60 \sim 120^\circ$ 范围运行。

2.3 电机在启动过程中的机械特性

根据无换向电动机的机械特性公式:

$$H = \frac{E_d}{K_E \varphi \cos(\gamma_0 - \frac{u}{2}) \cos \frac{u}{2} - \frac{R_s}{K_E K_M \cos^2(\gamma_0 - \frac{u}{2}) \cos^2 \frac{u}{2}} \quad (1)$$

式中: E_d —整流桥输出电压平均值;

α —整流桥的延迟角;

γ_0 —逆变桥的换流重叠角;

K_E —电势常数;

K_M —转矩常数;

M —转矩;

u —逆变桥的换流重叠角;

R_s —主回路总等效电阻。

整流桥输出直流电压平均值为:

$$E_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 \cos \alpha \quad (2)$$

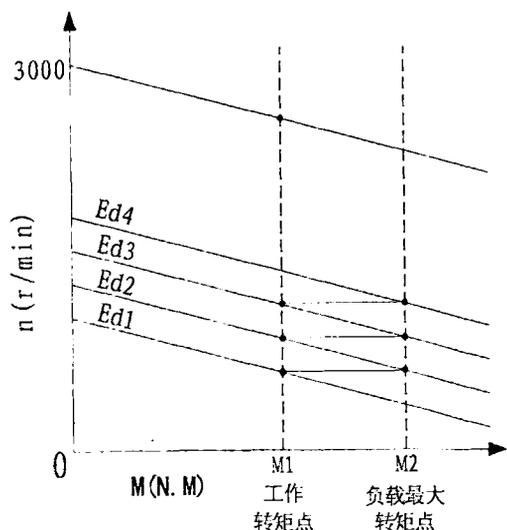


图9 电机调压时的机械性曲线

根据公式(2),当改变整流器的延迟角 α 时可改变整流器输出电压 E_d 的大小,得到一组平行的直线, $E_{d1} \rightarrow E_{d2} \rightarrow E_{d3} \rightarrow E_{d4} \dots$ 左图为其机械特性曲线。电机电压从 E_{d1} 曲线 $M1$ 额定工作转矩点开始上升到 E_{d2} 过程中,频率 f 要升高、电机升速、负载转矩开始增大,到电机最大转矩点 $M2$ 时

电机最大转矩克服负载转矩后转速加速上升,到达 E_{d2} 曲线工作转矩点 $M1$ 。

如此过程随着整流器可控硅控制角 α 的改变,电机电势 E_d 上升,电机转矩克服负载转矩,转速达到额定转速。从特性曲线可看出其机械特性较硬,有较高的调速范围。

3 变频启动器的控制系统

从德国 SIEMENS 公司引进的 SIMOVERT S 变频启动器的控制核心是 SIMADYN D 全数字交流控制系统,它的特点是:

(1) 适合快速的开、闭环控制和计算,最小的采样周期可达 1ms 。

(2) 适合所有的直流和交流领域的变速控制。

(3) 模块化的硬件和软件设计,应用起来更加灵活方便。

(4) 在一个 SIMADYN D 机箱中可插入 8 个处理器,它们之间独立工作,互不影响。

(5) 人机界面直观,可方便的设计和修改系统功能。

(6) 调试方便,调试周期短。

(7) 自诊断和保护功能强,智能化的故障诊断系统,可方便地查看故障原因及处理方法,从而大大的降低停机时间。

(8) 系统运行稳定,故障率低。

(9) 调速性能好,动态精度高。

(10) 可通过通讯网与其他的控制系统连接。

3.1 SIMADYN D 硬件组成

(1) 机箱

SIMADYN D 插件箱有 12 槽和 24 槽之分,用于安装插件板。机箱的后面有 L 和 C 两条总线。

(2) 处理器板

每一个处理器板都是一个 80186 微处理器。用于计算、调解、逻辑判断等。在 SIMADYN D 硬件中,处理器板有:

PM16: 通用处理器。用于速度调解,顺序控制等。

PG16: 电流处理器。用于调节整流器的输出电流。

PS16: 逆变处理器。用于电压模型计算,即完成逆变侧的控制与变换。

以上每个处理器都有自己的程序接口,编制的控制程序通过写入器固化在 EPROM 单元中,然后将 EPROM 单元插在处理器中。

(3) 数据缓冲期板 MM11。用于处理器间的

数据交换。

(4)综合输入输出板 EM11.用于模型量、开关量的输入与输出。

(5)模型量输出板 EA12。

(6)开关量输入输出板 EB11。

3.2 软件

版本。STRUCL 和 STRUCG。其中 STRUCL 是通过语句表编程软件包括系统软件和应用软件两部分。系统软件固化在处理器中,应用软件用于风机的控制系统。

应用软件有两个的,装在 DOS 操作系统下。STRUCG 是通过图形方式编写的,安装在 UNIX 操作系统下运行。

4 电动风机启动的原理和方法

电动鼓风机启动是电动机不断加速的过程,矢量控制技术的出现,使交流电动机的调速问题得到了很好的解决,经过磁场定向、坐标变换之后的交流电动机,在电磁转矩产生的意义上与直流电动机是等效的。特别是经过坐标变换之后的同步电动机与直流电动机没有什么差别了,因为同步电动机和直流电动机都是采用双边励磁。

对矢量控制技术的分析,是建立在已知气隙磁链矢量空间位置的基础上的。如果定向轴选取得不准,换句话说,系统不能准确地检测出气隙磁链的实际位置(磁链轴与定子轴之间的夹角),那

么在错误的定向轴下得到的定子、转子电流的期望值将不能保证解耦控制条件,因此,准确辨识(检测)气隙磁链的大小和空间位置是矢量控制的关键问题。在矢量控制中(磁场定向),不同的磁场定向要求检测相应磁场的大小和方位。目前常用的有气隙磁场定向和转子磁链定向。首钢风机控制系统是采用辨识气隙磁链的电压模型法。近十年来,各国均致力于无速度传感器的控制系统的研究,在此领域里,德国 SIEMENS 公司技术处于领先,它利用检测电机定子电压、电流等这些容易测量的物理量,检测来后对其在数学模型中进行速度计算以取代速度传感器。其关键在于获取速度信息,在保证较高的控制精度的同时,满足控制的要求。这里是利用了电压模型法,无传感器控制技术不需要检测硬件。在首钢电动鼓风机变频软启动控制系统中充分利用了这一先进技术。同时,由于电动鼓风机变频软启动控制系统没有电机转子位置检测装置,是采用电压模型法判断电机转子位置,故对其进行进一步的研究。

4.1 电动机控制的原理

电动机变频调速控制系统可分为整流侧调速控制系统和逆变侧调频控制系统,它属于交-直-交电流型变频器。另外,系统还包括并网控制装置。

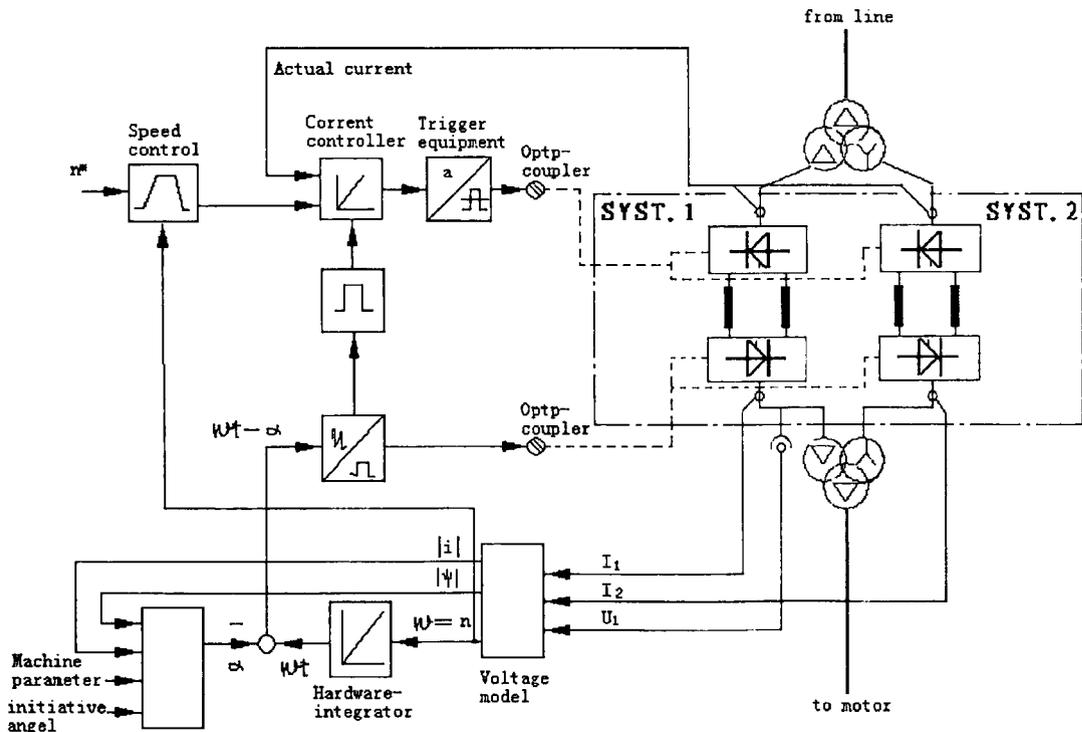


图 10 变频启动控制系统的基本构成与原理图

由图 10 所示,调速系统是由一个电流环和一个速度环组成的负反馈双闭环调节系统。 n^* 是变频调速控制系统根据电动机参数而给定的电动机加速的速度给定, n 是经电压模型变换后的实际转速的标准信号; n^* 、 n 经速度控制器后得到电流给定信号,该信号直接去控制电流环,成为电流环的给定信号。这一电流控制量再与电流环反馈电流的实际值相比较,去调节整流器的 α 角,从而调节整流器的输出电流 I_d ,同时逆变器是把整流出的直流电流 I_d 逆变为一定频率的交流电,从而达到控制转速的目的。逆变器换相频率由转子转速决定。这一调节的全过程应使逆变器换相频率不断上升。

4.2 电压模型

电压模型是系统识别电机转速、转子位置的理论基础,是整个系统的核心。电压模型利用测取的定子三相电压实际值 u_R^s 、 u_S^s 、 u_T^s 直接计算电动机磁链矢量 Ψ 的模 Ψ 和位置角 φ^s (位置角 φ^s : 磁链位置角,从定子轴 α 到气隙磁链 M 轴的夹角),故称直接法,其步骤如下:

(1) 利用 3/2 变换将能够被检测到的三相定子坐标系(R、S、T 轴系)的 u_R^s 、 u_S^s 、 u_T^s 和定子电流 i_R^s 、 i_S^s 、 i_T^s 三个量变换成两相定子坐标系($\alpha - \beta$ 轴系)中的 u_α^s 、 u_β^s 、 i_α^s 、 i_β^s 四个分量。

$$u_\alpha^s = u_R^s - u_S^s/2 - u_T^s/2 \quad (1)$$

$$u_\beta^s = 3^{-1/2} u_S^s/2 - 3^{-1/2} u_T^s/2 \quad (2)$$

$$i_\alpha^s = i_R^s - i_S^s/2 - i_T^s/2 \quad (3)$$

$$i_\beta^s = 3^{-1/2} i_S^s/2 - 3^{-1/2} i_T^s/2 \quad (4)$$

(2) 利用 $\Psi = \int e^s dt = \int (u^s - r^s i^s) dt - L^s \sigma i^s$ 关系,在 $\alpha - \beta$ 坐标系中计算 Ψ_α 和 Ψ_β

$$\Psi_\alpha = \int e_\alpha^s dt = \int (u_\alpha^s - r^s i_\alpha^s) dt - L^s \sigma i_\alpha^s \quad (5)$$

$$\Psi_\beta = \int e_\beta^s dt = \int (u_\beta^s - r^s i_\beta^s) dt - L^s \sigma i_\beta^s \quad (6)$$

式中: r^s 、 $L^s \sigma$ —定子绕组电阻及漏感。

电压模型原理图如图 11。

(3) 利用矢量分析器(VA),在 $\alpha - \beta$ 坐标系中计算磁链矢量 Ψ 的模 Ψ 和位置角 φ^s 。把电压模型的输出 Ψ_α 和 Ψ_β 送至矢量分析器 VA,矢量分析器 VA 如图 12,求模 Ψ 和幅角 φ^s ,磁链的实际值信号 Ψ 和磁链位置角信号 $\cos\varphi^s$ 和 $\sin\varphi^s$ 供定子电流控制。

$$\Psi = (\Psi_\alpha^2 + \Psi_\beta^2)^{1/2} \quad (7)$$

$$\cos\varphi^s = \Psi_\alpha / \Psi \quad (8)$$

$$\sin\varphi^s = \Psi_\beta / \Psi \quad (9)$$

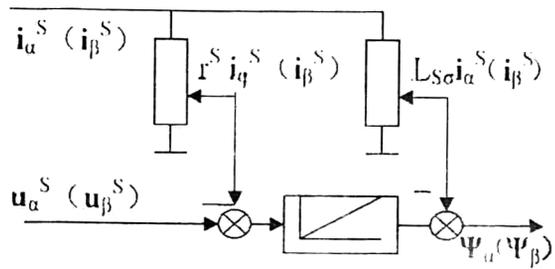


图 11 电压模型原理

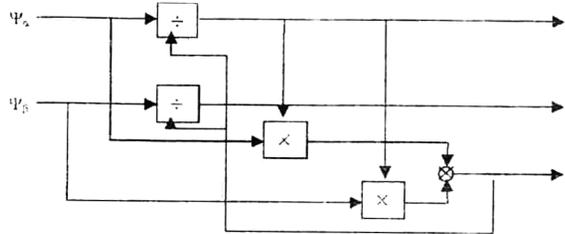


图 12 矢量分析器

4.3 初始定位

按一定的时间间隔和顺序去导通一定的可控硅这项任务是由转子位置检测系统来完成的。转子定位就是在电机启动前励磁绕组通电的过程中,转子绕组产生的磁通将在定子绕组中感应出反电势,检测出三相反电势的大小和方向也就是判定出电动机转子磁极与定子旋转磁场之间的相对位置,并把该位置信号送到电压模型中。及时分配给逆变器的各可控硅元件。

4.3 风机变频启动过程

因本系统的控制是采用无换相器的直流的控制方式,需要随时检测电机的瞬时速度,对所检测回来的电压、电流的精确值,在 PS16 处理器模块中的“UMS”功能块进行电压模型进行运算,得出磁链位置角及磁链的大小。“UMS”功能块有五种工作方式,分别是:

工作方式一:

转子位置构造,用于励磁建立时计算电机中的磁场的大小和位置。

工作方式二:

有编码器磁场位置检测,用于电机有位置编码器时加速阶段或低速范围的驱动。

工作方式三:

有转子位置传感器磁场位置检测,用于电机有转子位置检测器时加速阶段或低速范围的驱动。

工作方式四:

电压模型 1,用于位置检测之后没有电机转子位置编码器的驱动以及电机转速大于额定转速

的驱动。

工作方式五:

电压模型 2,用于电压模型 1 之后,电机转度从 5~10% nN 到额定转速驱动。

主电机从启动指令发出到启动完毕同步并网,经历了启动加速、“断续-负载换相”切换、逆变器触发控制方式切换、整步微调 and 同步并网等几个阶段。

4.5 启动、加速

主机启动之前首先确认起车条件,主要包括动力油压、润滑油压、静叶角度、放风门等工艺参数是否正常,高压开关位置状态是否正常,励磁、变频装置是否具备工作条件,保护柜是否正常等。起车条件具备后,开主机顶轴油泵,启动盘车器。盘车时转速是主电机额定转速的 1% (约 30rpm)。按下起车按钮发出启动指令后,励磁柜投入运行,然后合上变频器的输入、输出开关,使整个启动系统投入运行,开始启动。

启动之初,电机转速较低,逆变器换相方法采用电流断续换相换相。

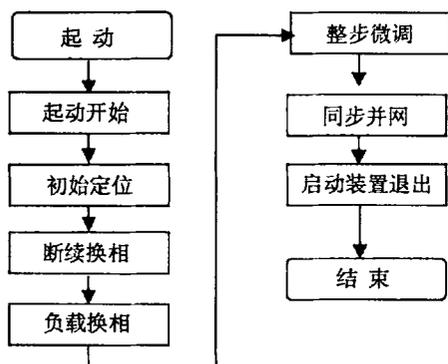


图 13 启动过程

同步电动机加速到额定转速的 10%, 逆变器输出电流频率为 5Hz 时, 电机定子产生的反电动势足够大, 这时逆变器转入负载反电动势换相, 完成了换相方式的转换。同时, “UMS” 电压模型功能块的工作方式由“工作方式四”转到“工作方式五”, 这时电压模型计算出的气隙磁链矢量的两个分量 Ψ_a 和 Ψ_b 非常准确, 经矢量分析器后就可以得到电动机内实际气隙磁链的幅值 Ψ 和空间位置 φ^s , 这样可以精确定出实际气隙磁链的空间位

置和旋转速度。通过 SIMADYN D 控制使电机不断加速, 至额定转速的 90%~97% (实际整定为 98%, 称亚同步状态) 时, 系统进入整步微调阶段。

4.6 自动整步微调控制阶段

进入本阶段后, 并网装置 (Paralleling Device, 又称同步装置, 平行装置) 开始启动投入工作, 协同变频启动系统工作。并网装置根据电网电压和同步电动机的端电压两者频率上的差值 Δf 、电压差值 ΔU 、相位差值 ΔS_y , 产生一个附加的转速微调信号, 传送给变频调速系统, 对同步电机转速做微调, 以使两者的频率差值减小到零; 与此同时, 励磁系统则由自动电压平衡单元控制同步电动机的转子励磁电流, 以使同步电动机端电压和电网电压平衡。

4.7 并网控制阶段

在启动过程中, 当速度达到亚同步, 即 98% nN 时, 并网装置投入运行, 速度继续上升, 励磁与变频相配合参与调节, 此时励磁按电压调节原则进行, 在变频和励磁的共同调节下, 电机的电压和速度在 100% 处来回徘徊。并网装置开始寻找下列条件:

- ① 电网与变频器电压的比较
- ② 电网与变频的频率的比较
- ③ 电网与变频器输出的相位角的比较

当满足 $\Delta U < 5\% U_N$ (电压差), $\Delta f < 1/4\text{Hz}$ (频率差), $\Delta S_y \approx 0^\circ$ (相位差) 时, 并网条件即告成立。此时并网装置向变频控制系统发出可并网命令, 变频控制系统收到可并网命令后既可发出并网命令。

4.8 并网及并网后启动装置的退出

当并网条件满足时, 并网装置向变频启动系统发出并网信号, 变频启动系统收到并网信号后自动地将整流器触发角 α 推到 135° , 整流器输出电流迅速下降到零, 然后封锁整流器和逆变器的全部触发脉冲。与此同时, 发出并网命令, 控制下列操作: 合上同步电动机的并网开关, 同时, 分断变频器的电源侧的开关和负载侧的开关。并网后, 变频启动装置退出, 启动全过程结束。从启动到完成并网历时约 3min。