

高性能交-直-交同步电动机变频调速系统的研究与应用

郭艳兵, 许海涛

(北京金自天正智能控制股份有限公司轧钢事业部, 北京 100070)

摘要: 在冶金轧钢领域, 中小容量他励同步电动机应用广泛, 以 1450 热轧 E2 立辊轧机为例, 阐述交-直-交同步电动机变频调速系统的配置方案、控制功能图和关键技术、工程调试方法以及系统在轧钢时各参数的波形分析, 该系统为中小容量同步电动机控制提供了可以自主掌控的解决方案。

关键词: 同步电动机; 矢量控制; 速度控制; 电流控制; 磁链观测; 弱磁控制

Research and application of high performance AC-DC-AC Synchronous motor frequency control system

GUO Yanbing, XU Haitao

(Beijing Aritime Intelligent Control Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: In the field of metallurgical steel rolling, small and medium capacity separately excited synchronous motors are widely used. Taking 1450 hot-rolled E2 edger-rolls mill as an example, the configuration scheme, control function diagram, key technologies and engineering debugging methods of AC-DC-AC synchronous motor variable frequency speed regulation system are expounded, as well as the waveform analysis of various parameters in practical application of the system are expounded. This system provides a self-controlled solution for the control of small and medium capacity synchronous motors.

Key words: synchronous motor; vector control; speed control; current control; flux observation; field weakening control

0 引言

目前, 热轧立辊轧机、卷取机和带钢冷轧机等中小容量交流电动机应用广泛, 电动机容量一般在 750~1500 kW/690 V 之间, 驱动电动机可以是同步电动机和异步电动机, 这类电动机具有体积小、弱磁调速范围宽(弱磁比 $n_{\max}/n_N > 2.5$)和过载能力强等特点。同步电动机和异步电动机的特点比较如下表所示。从表中看出, 同步电动机具有功率因数可调节、变频器容量小、

弱磁调速范围宽(弱磁比 4:1)、控制准确度高、体积和转动惯量小以及动态转矩响应快等明显优势。除此之外, 同步电动机在恒功率(弱磁运行)运行时, 可以提供更大的电磁转矩, 其最大转矩 $M_{\max}$ 随电动机频率增加呈一次方减少, 即 $M_{\max} \propto 1/f$; 而异步电动机随电动机频率增加呈二次方减少, 即 $M_{\max} \propto 1/f^2$, 异步电动机需要采取增加容量或提高电压的方法来增大弱磁后的最大转矩, 所以, 对于弱磁比大于 2.5 的电动机选用

同步电动机为最佳^[1]。本文以热轧E2立辊轧机为例，介绍西门子变频器结合自主研发的同步电动机变频调速系统。

表 同步电动机和异步电动机的特点比较

Tab. Comparison of the characteristics of synchronous and asynchronous motor

	同步机	异步机
结构	复杂	简单坚固
效率	97%	95%
功率因数	1	0.85
制作工艺	气隙大，制作容易	气隙小，大容量制作较困难
转动惯量	小	大
变频器功率因数	较高	较低
控制系统	矢量控制较复杂	矢量控制较简单
控制准确度	较高	较低
变频装置容量	100%	130%
允许的弱磁比	高	低

1 同步电动机电控系统配置方案

电控系统主要分为三部分：定子电控系统、转子电控系统以及转子初始角定位系统^[2]，它们之间通过网络进行数据交换。图1为电控系统配置图。

1.1 定子电控系统

定子电控系统的整流部分原来采用晶闸管整流回馈单元，由于该系统会发生逆变颠覆故障，损坏器件，从而产生影响。改造后采用开关型电网换流IGBT整流回馈单元^[3]，整流功能由续流二极管完成，逆变功能通过IGBT在电网自然换相点的导通和关断来完成。该整流回馈单元的优点在于可以避免逆变颠覆故障，性价比高，控制方式简单，使用维护方便。IGBT整流回馈单元需要加进线电抗器（ $U_K=4\%$ ），用以限制可能出现

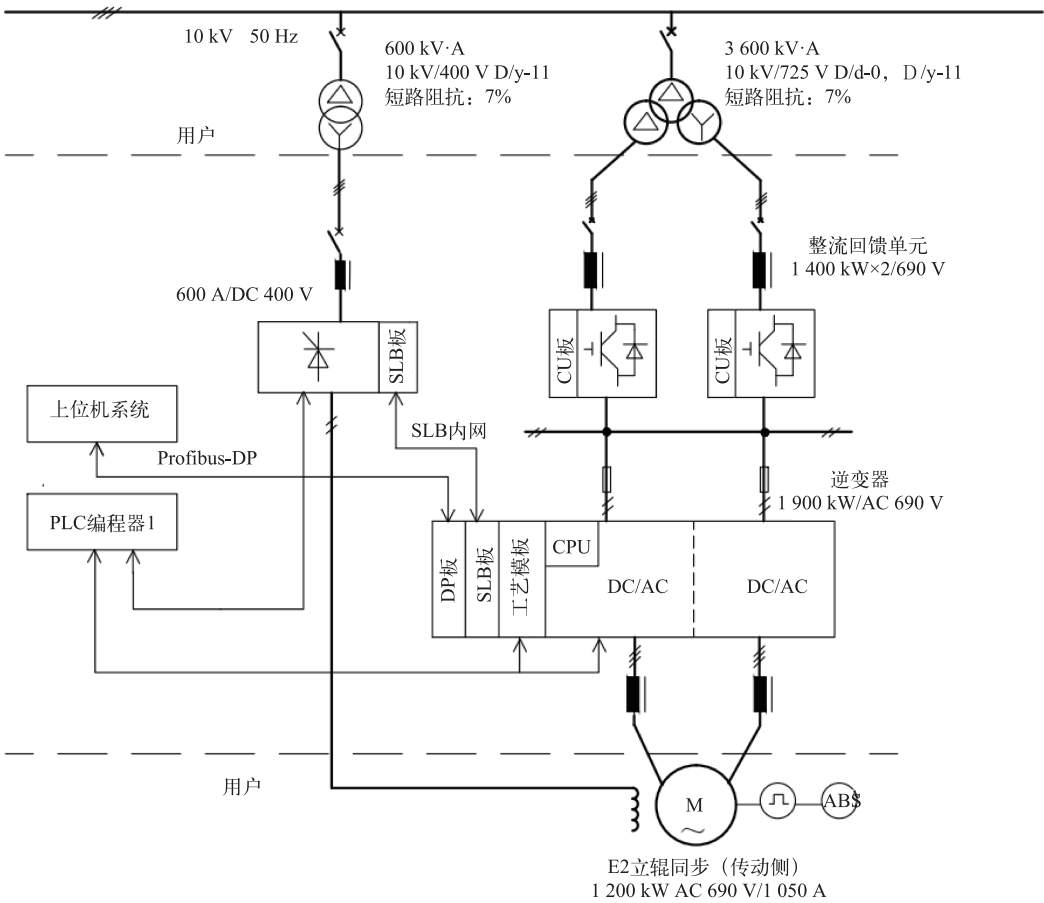


图 1 E2 立辊传动侧电控系统配置图

Fig. 1 E2 edger roller control system configuration diagram

的环流以及无功电流的冲击。

逆变器为主、从并联的IGBT交-直-交两电平拓扑结构，其输出和电动机双绕组之间加有输出电抗器，用以降低由于PWM调制产生的 du/dt ，保护变频器和电动机。逆变器内的CPU板完成同步电动机矢量控制等核心功能。

1.2 转子电控系统

转子电控系统由一套晶闸管三相全桥不可逆晶闸管整流装置组成，为同步电动机转子提供励磁电流。为满足快速动态特性的工艺要求，转子励磁需要强励以增加励磁电流的快速性，一般进线电压选择额定电压的3~4倍，本系统选用400 V进线电压。

1.3 转子初始角定位系统

同步电动机需要安装增量式码盘（有Z脉冲，消除误差积累）和绝对位置码盘（单圈，有断电记忆功能），增量式码盘信号接入CPU板，完成转速闭环控制及转子位置角检测。绝对位置编码器信号接入工艺模板，完成转子初始位置角 λ_0 的检测，并传送给逆变器CPU板作为计算转子位置角 λ 的基础^[4]。

1.4 网络拓扑结构

逆变器中的CPU板、SLB板、DP板以及工艺模板都安插在背部总线上，SLB板通过传动内部网络完成电动机定转子控制系统之间内部数据交换，包括励磁给定、励磁反馈及故障等信息。DP板通过Profibus网完成立辊电控系统与上位机的数据交换，包括电动机速度给定及电动机状态等信息。

2 同步电动机矢量控制系统

由于立辊轧机、卷取机和带钢冷轧机的工作特点是频繁起制动、加减速、正反转运行以及突加、突减负载，要求控制系统具有动态响应快以及稳态准确度高等特性，本系统采用按气隙磁链定向（ $\phi_1-\phi_2$ 轴）的矢量控制，完成同步电动机的电压、电流、转矩、磁链和转速的解耦，加之动态预控及前馈控制，实现高性能的变频调速系

统^[5]，能很好地满足生产工艺要求。同步电动机气隙磁链定向矢量图如图2所示。

同步电动机矢量控制主要为三部分功能：速度控制、电流控制以及磁链观测和弱磁控制功能。

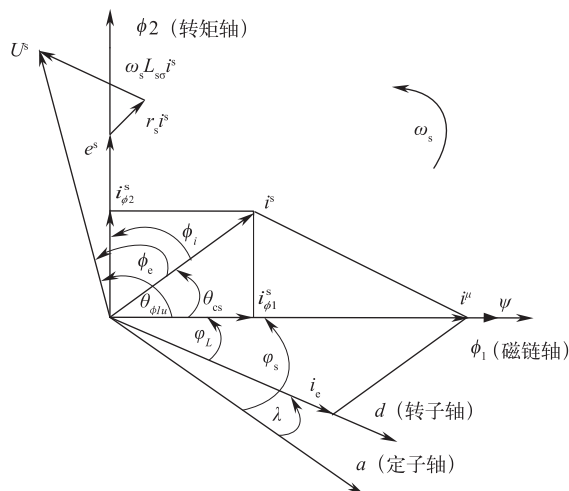


图2 同步电动机气隙磁链定向矢量图

Fig. 2 Vector diagram of flux orientation

图2中， U^s 、 e^s 、 i^s 、 ω_s 分别为定子电压、电动势、电流和角速度； L_{sg} 、 r_s 分别为定子绕组漏感、电阻； ψ 为磁链实际值； $i_{\phi 1}^s$ 、 $i_{\phi 2}^s$ 分别为磁化分量电流与转矩电流； i_c 为转子励磁电流； i^u 为磁化电流； λ 为转子位置角； φ_s 为磁链位置角； φ_L 为负载角； $\theta_{\phi 1u}$ 为定子电压 U^s 与 ϕ_1 轴的夹角； θ_{cs} 为定子电流 i^s 与 ϕ_1 轴的夹角； ϕ_i 、 ϕ_c 分别为内、外功率因数角。

2.1 速度控制

速度控制主要包括给定积分器、速度PI调节器、速度反馈及滤波、动态转矩预控、软化功能和转矩限幅等模块^[5]，如图3所示。

图3中， n^* 为速度给定； n 为速度反馈； T 为电磁转矩； ΔT 为附加动态转矩； $i_{\phi 2}^{s*}$ 为转矩电流给定； λ 为转子位置角； T_m 为机电时间常数； ψ 为磁链实际值。

给定积分器限制给定信号的变化率，速度调节器的输出是转矩 T_d ，根据转矩公式 $T = K_m \psi i_{\phi 2}^s$ （ ψ 由磁链观测器求出），形成转矩电流给定 $i_{\phi 2}^{s*}$ 。动态转矩预控能更好地跟踪转速变化，给定积分

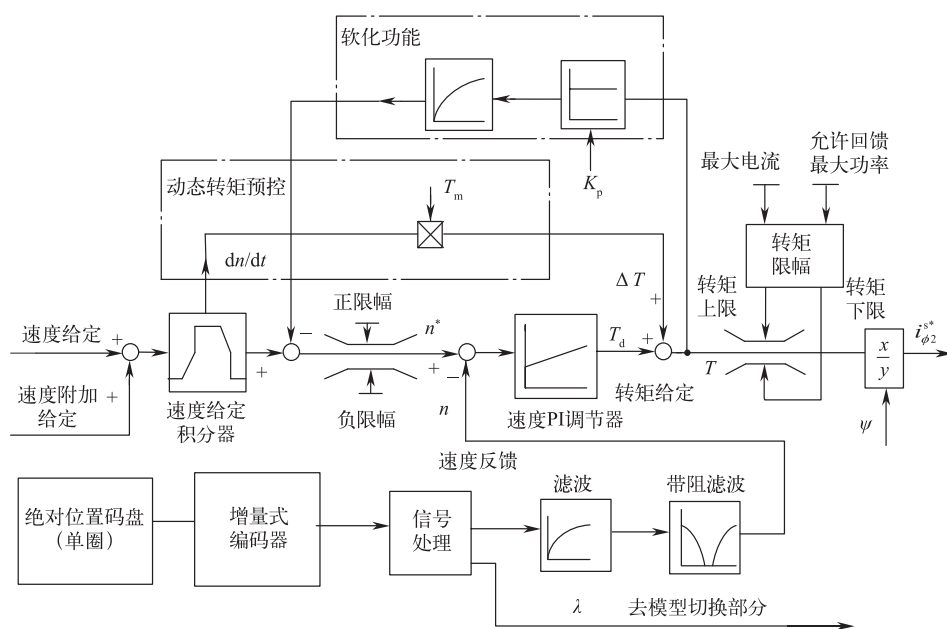


图 3 速度控制功能图

Fig. 3 Speed control function diagram

器产生 dn/dt 计算, T_m 为机电时间常数, 附加动态转矩为 $\Delta T = T_m \times dn/dt$, ΔT 直接加到转矩给定 T 上, 保证电动机在加减速轧制过程中能够很好地跟踪速度给定。软化功能通过干预速度给定, 快速地实现有效的负载分配。从电流调节器前端采集转矩给定信号 T , 乘以调整系数 K_p 后返回到速度给定, 对速度给定作调整 and 适应。及时投入

软化功能, 能够使电流环快速退饱和, 防止电动机堵转对机械设备造成损坏。

2.2 电流控制

电流控制主要包括三相交流电流控制、功率因数 $\cos\varphi$ 控制以及坐标变换（K/P变换）等模块^[6]，如图4所示。

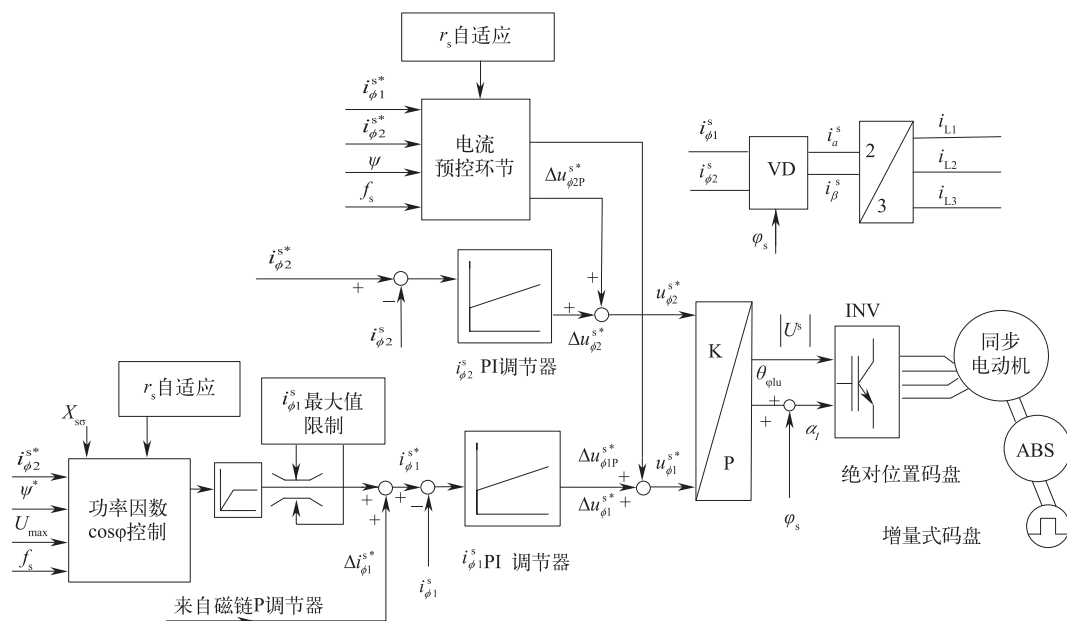


图 4 电流控制功能图

Fig. 4 Current control function diagram

图4中, $i_{\phi 1}^{s*}$ 、 $i_{\phi 1}^s$ 分别为磁化分量电流给定及反馈; $i_{\phi 2}^{s*}$ 、 $i_{\phi 2}^s$ 分别为转矩电流给定及反馈; $X_{s\sigma}$ 、 r_s 分别为定子绕组漏抗、电阻; i_{α}^s 、 i_{β}^s 分别为 α 、 β 轴电流矢量; f_s 为定子频率给定; $U_{\max}$ 为直流母线最大值; $|U^s|$ 为定子电压的幅值; $\theta_{\phi 1u}$ 为定子电压 U^s 与 ϕ_1 轴的夹角; φ_s 为磁链位置角; α_1 为定子电压 U^s 与 α 轴之间夹角; $\Delta i_{\phi 1}^{s*}$ 为磁链P调节器输出。

三相交流电流控制由 $i_{\phi 1}^s$ 、 $i_{\phi 2}^s$ 电流PI调节器和电流预控环节构成。其中转矩电流给定 $i_{\phi 2}^{s*}$ 由速度控制获得, 磁化分量电流给定 $i_{\phi 1}^{s*}$ 由功率因数 $\cos\varphi$ 控制获得, $i_{\phi 1}^{s*} = (\tan\phi_c^* - L_{s\sigma} i_{\phi 2}^{s*} / \psi^*) i_{\phi 2}^{s*}$, 反馈量分别由实际定子电流 i_{L1} 、 i_{L2} 和 i_{L3} 经过3/2变换得到 $i_{\phi 1}^s$ 和 $i_{\phi 2}^s$, 电流预控环节的作用是加快电流调节过程及实现 $i_{\phi 1}^s$ 、 $i_{\phi 2}^s$ 的解耦。定子电压给定 $u_{\phi 1}^{s*}$ 和 $u_{\phi 2}^{s*}$ 经过坐标变换(K/P变换)得到定子电压矢量的幅值 $|U^s|$ 和与 α 轴的夹角 α_1 , 如式(1)所示, 磁链位置角 φ_s 由磁链观测器求出。

$$\begin{cases} |U^s| = \sqrt{u_{\phi 1}^{s*2} + u_{\phi 2}^{s*2}} \\ \theta_{\phi 1u} = \arctan \frac{u_{\phi 1}^{s*}}{u_{\phi 2}^{s*}} \\ \alpha_1 = \theta_{\phi 1u} + \varphi_s \end{cases} \quad (1)$$

式(1)的结果输入给PWM控制部分, 按电压空间矢量计算各IGBT元件开通、关断状态并发出PWM脉冲信号, 逆变器INV输出三相定子电压 $U_{A,B,C}^s$ 。

2.3 磁链观测和弱磁控制

2.3.1 磁链观测

同步电动机磁链观测器包括电流模型IM和电压模型UM^[7], 用于计算磁链的幅值 ψ 和角度 φ_s 。

电流模型根据已知的 ψ^* 、 $i_{\phi 1}^{s*}$ 、 $i_{\phi 2}^{s*}$ 、 λ 以及电动机参数(X_{hd} 、 X_{hq} 、 $X_{Dd\sigma}$ 、 $X_{Dq\sigma}$ 、 R_{Dd} 、 R_{Dq})计算出气隙磁链幅值 ψ^i 、负载角 φ_L 、磁链位置角 φ_{sim} 以及转子励磁电流给定 i_{e1}^* 。由于凸极同步电动机的 d 、 q 轴磁路不对称, 磁化电流 i^u 与 ϕ_1 - ϕ_2 轴不重合, 考虑电动机阻尼绕组的影响, 利用矢量变换从 ϕ_1 - ϕ_2 轴变换到 d - q 轴, 得

到 d - q 轴的磁链 ψ_d 和 ψ_q , 经过坐标变换(K/P变换)可得出磁链幅值 ψ^i 、负载角 φ_L 以及磁链位置角 φ_s , 如式(2)所示。电流模型还根据定子电流给定 $i_{\phi 1}^{s*}$ 、 $i_{\phi 2}^{s*}$, 计算出转子励磁电流给定 $I_{e1}^* = \sqrt{(\psi^* / L_h - i_{\phi 1}^{s*})^2 + (i_{\phi 2}^{s*})^2}$ (L_h 为主电感), 经过G参数(定子、转子之间的折算系数)调整, 求出转子励磁电流调节器给定 I_e^* 。

$$\begin{cases} \psi^i = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2} \\ \varphi_L = \arctan \psi_q / \psi_d \\ \varphi_{sim} = \lambda + \varphi_L \end{cases} \quad (2)$$

电压模型根据已知定子电压 $u_{\alpha\beta}^s$ 和定子电流 $i_{\alpha\beta}^s$, 可以计算出气隙磁链 ψ^u 的幅值和磁链位置角 φ_{sum} , 具体为

$$\begin{cases} \psi_{\alpha} = \int (u_{\alpha}^s - r_s i_{\alpha}^s) dt - L_{s\sigma} i_{\alpha}^s \\ \psi_{\beta} = \int (u_{\beta}^s - r_s i_{\beta}^s) dt - L_{s\sigma} i_{\beta}^s \\ \psi^u = \sqrt{\psi_{\alpha}^2 + \psi_{\beta}^2} \\ \varphi_{sum} = \arctan \psi_{\beta} / \psi_{\alpha} \end{cases} \quad (3)$$

式中, r_s 为定子绕组电阻; $L_{s\sigma}$ 为定子绕组漏感。

电流模型依赖电动机参数, 受参数影响较大, 适用于低速工况。电压模型基于定子电动势积分, 适用于中高转速工况。本系统结合电流模型和电压模型的优点, 利用模型切换实现混合磁链观测, 根据自适应系数 $k=f(n)$ 分配权重, 实现无扰动平滑过渡, 具体为

$$\begin{cases} n \leq 5\% & \begin{cases} \varphi_s = \varphi_{sim} \\ \psi = \psi^i \end{cases} \\ 5\% < n < 10\% & \begin{cases} \varphi_s = (1-k)\varphi_{sim} + k\varphi_{sum} \\ \psi = (1-k)\psi^i + k\psi^u \end{cases} \\ n \geq 10\% & \begin{cases} \varphi_s = \varphi_{sum} \\ \psi = \psi^u \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

2.3.2 弱磁控制

弱磁控制主要包括磁通计算、磁通特性、定子电压调节器和磁链调节器等模块, 如图5所示。定子电压调节器和磁链调节器构成双闭环, 当电动机运行在额定转速以下($|n| < n_N$, 恒转矩调节)时, 此阶段定子电压环为开环, 输出限幅为零而不起作用, 磁链调节器闭环, 磁链恒定;

当运行在额定转速以上 ($|n| > n_N$, 恒功率调节) 时, 此阶段定子电压调节器投入闭环运行, 电压恒定, 实现弱磁升速。磁通计算模块完成电动势 EMFc (e^s) 的计算, 经过磁通特性曲线得出磁链给定, 如式 (5) 所示, 磁链调节器实际反馈值 ψ 由磁链观测器得出。电压环给定为定子额定电压 U^s , 反馈为求出的定子电压的幅值 $|U^s|$ 。

$$\begin{cases} |n| \leq n_N & \psi^* = \psi_N^* \\ |n| > n_N & \psi^* \propto \text{EMFc} / n \end{cases} \quad (5)$$

磁链调节由比例和比例-积分两部分组成, 比例部分输出 $\Delta i_{\phi 1}^{s*}$ 参与 $i_{\phi 1}^s$ 调节器的给定, 可以动态调节磁链; 比例-积分部分输出 $\Delta i_{\phi 1}^{e*}$ 与电流模型输出的转子电流给定 I_{cl}^* 叠加, 作为转子电流调

节器给定 I_c^* , 可以实现无差调节气隙磁链。

图5中, ψ^* 、 ψ 分别为磁链给定、磁链实际值; X_{hd} 、 X_{hq} 分别为 d 、 q 轴饱和主电抗; $X_{s\sigma}$ 为定子漏抗; $X_{Dd\sigma}$ 、 $X_{Dq\sigma}$ 分别为 d 、 q 轴阻尼绕组漏抗; R_{Dd} 、 R_{Dq} 分别为 d 、 q 轴阻尼绕组电阻; I_c^* 、 I_c 分别为转子电流给定及反馈; I_{cl}^* 为 IM 模型输出转子电流给定; U_a^s 、 U_β^s 分别为 α 、 β 轴电压矢量; i_a^s 、 i_β^s 分别为 α 、 β 轴电流矢量; f_s 为定子频率给定; λ 为转子位置角; φ_s 为磁链位置角; φ_L 为负载角; φ_{sim} 为电流模型磁链角; φ_{sum} 为电压模型磁链角; ψ^i 为电流模型磁链; ψ^u 为电压模型磁链。

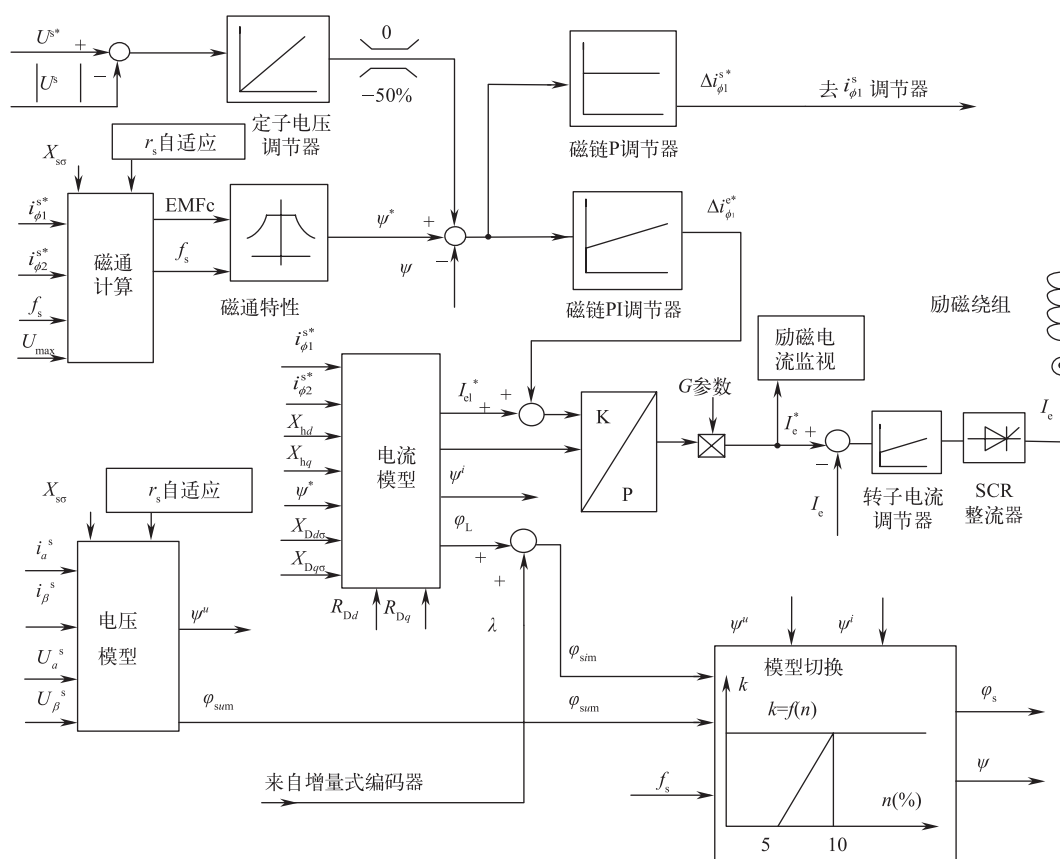


图5 磁链观测及弱磁控制功能图

Fig. 5 Flux observation and field weakening control

3 现场实际应用

本系统用于1450热轧E2立辊轧机传动, R2平辊和E2立辊在奇道次轧制时会形成连轧关

系, E2立辊会投入使用^[8]。同步电动机额定功率为1 200 kW, 额定电压/电流为690 V/1 050 A, 转速为140/420 r/min, 转子额定电压/电流为85 V/322 A。

3.1 工程调试方法（电动机空载情况下）

（1）输入电动机额定参数

包括电动机定子、转子和等效电路等额定参数。

（2）检查增量式码盘极性

用开环模式运行电动机，检查增量码式盘极性及其绝对位置码盘读数。

（3）确定初始位置角 λ_0

电动机转子绕组通电，定子绕组通直流 $I_{\phi 1}$ ，电动机旋转后停止，此时 d 轴与定子A相绕组轴线（ α 轴）重合时编码器的输出值即为转子初始位置角 λ_0 。

（4）电流模型调试

校正 G 参数（定、转子系的折算系数）及 d 、 q 轴饱和主电抗 X_{hd} 和 X_{hq} ，测量饱和磁化曲线。

（5）优化转速调节器

电动机运行在额定转速的40%时，转速给定突加2%的阶跃响应，调整调节器 K_p 、 T_n 等参数，使满足超调量 $\sigma < 5\%$ 和恢复时间 $t_s < 100$ ms。

（6）优化转子电流调节器

转子励磁电流从0%突加到80%，调整调节器 K_p 、 T_n 等参数，使满足超调量 $\sigma < 10\%$ 和恢复时间 $t_s < 200$ ms。

（7）优化磁通调节器

电动机运行在额定转速的80%时，磁通给定突加5%的阶跃，调整磁通P+PI调节器 K_p 、 T_n 等参数，使满足超调量 $\sigma < 10\%$ 和恢复时间100 ms。

（8）电压模型调试

校正定子电阻 r_s 及定子漏感 $L_{s\sigma}$ ，并激活 r_s 温度自适应功能。

经过以上步骤，同步电动机可以空载或负载运行。

3.2 轧钢时波形分析

图6为立辊E2三个道次轧制波形。从波形上看，在第一道次，立辊轧机空载运行在150 r/min时咬钢，转矩电流为640 A；第二道次空过；在第三道次，电动机空载运行在170 r/min时咬钢，

之后提速到250 r/min，转矩电流为500 A，整个轧制过程电动机都处在弱磁状态，磁链波形平稳，磁化分量电流和转矩电流共同作用保证磁链稳定以满足轧制要求。同时还看出，速度反馈跟随性很好，而且动态速降很小，电动机处于电动状态，没有被拖拽或堵转现象，满足生产工艺要求^[9]。说明系统矢量控制的电流/电压模型适配电动机，调节器参数设置合理。

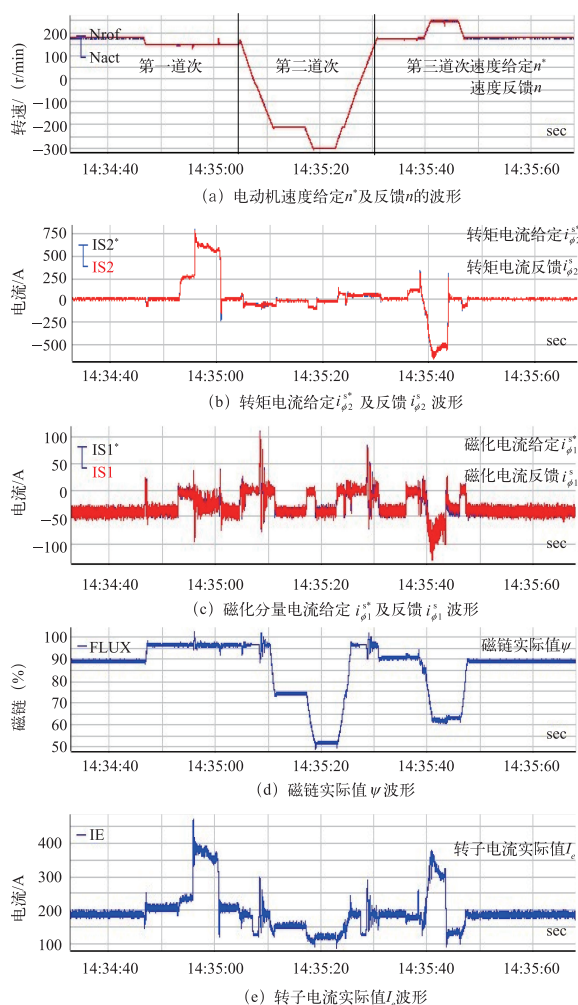


图6 E2立辊轧制时各参量波形

Fig. 6 Waveforms of parameters during E2 edger rolling

4 结束语

1) 热轧立辊轧机、卷取机和带钢冷轧机等中小容量交流电动机具有弱磁调速范围宽（弱磁比 $n_{\max}/n_N > 2.5$ ）、过载能力强等特点，通过比较同步电动机和异步电动机的特点和实践结果可

知,这类电动机选择同步电动机为最佳。

2) 本文总结和分析了同步电动机气隙磁链定向矢量控制的功能图,论述了转速控制、电流控制及磁链观测和弱磁控制等关键技术,提供了工程调试方法,分析了实际应用典型波形,为高性能同步电动机控制系统的研究和应用提供了参考。

3) 本文提出的同步电动机控制系统具有通用性,其中,进口(或国产)变频器控制电动机定子,晶闸管整流器(国产)控制电动机转子,工艺模板(国产)计算转子初始位置角,它们之间通过网络进行数据交换。此配置模式已在多个现场取得很好的应用效果,对突破技术壁垒、进一步自主创新具有实际意义。**EA**

参考文献

- [1] 马小亮. 高性能变频器调速及其典型控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [2] 傅培众, 郭艳兵, 徐伟光, 等. 交-直-交同步电动机矢量控制系统的工程应用[J]. 电气传动, 2008, 38(12): 53.
- [3] 魏秀意, 朱春毅, 许海涛, 等. IGBT 整流回馈单元的研究及在轧机传动系统的应用[J]. 冶金自

动化, 2021, 45(4): 74.

- [4] 张建军. ABB 中压多传动 ACS6000 在热轧中的应用[J]. 冶金自动化, 2018, 42(4): 59.
- [5] 马小亮. 高性能变频调速系统的几个应用问题[J]. 电气传动, 2020, 50(2): 3.
- [6] 李崇坚. 交流同步电动机调速系统[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [7] 南永辉, 马振宇, 肖雄. 可逆冷轧机中压交直交主传动变频系统开发及应用[J]. 冶金自动化, 2020, 44(6): 61.
- [8] 张国华. 粗轧平辊与立辊的微张力控制技术[J]. 冶金自动化, 2018(增刊): 80.
- [9] 廖荣辉, 张纯民, 李永波, 等. 高线轧机交流主传动工程型变频器的研制与应用[J]. 冶金自动化, 2017, 41(6): 61.

作者简介



郭艳兵

郭艳兵(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事冶金自动化及电气传动方面的科研及工程应用。

(收稿日期: 2021-05-25)