

串级调速系统中的变流技术

张兴起¹, 罗敏², 任开春¹, 张小春¹, 张迁¹

(1. 重庆通信学院, 重庆 400035; 2. 75706部队, 广东 海丰 516400)

摘要: 高压大容量电机采用的串级调速是高效稳定的调速方法, 其变流技术直接决定了串级调速的调速性能。文章对基于不同变流器的串级调速系统进行分析与研究, 对完善串级调速系统的设计、促进变流技术的发展有一定意义。

关键词: 串级调速系统; 变流技术; 电气制动; 矩阵变流器

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2011)06-0043-04

Converter Technology in Cascade Control System

ZHANG Xing-qi¹, LUO Min², REN Kai-chun¹, ZHANG Xiao-chun¹, ZHANG Qian¹

(1. Chongqing Communication College, Chongqing 400035, China; 2. 75706 Troops, Haifeng, Guangdong 516400, China)

Abstract: Cascade control used in high-voltage and large-capacity winding motor speed adjustment is a high efficient and stable method, and the converter technology directly determines the speed adjusting performance of cascade control system. By studying on the cascade control systems consist of different converters, it has certain significance to improve the design of the cascade control system and to promote the development of the converter technology.

Key words: cascade control system; converter technology; electric braking; matrix converter

0 引言

三相异步电机拖动的风机和水泵是工业生产中广泛应用的生产设备, 耗电量占工业用电量的40%以上^[1]。通过调节电机转速, 控制风机、水泵运行时的流量, 可以取得良好的节能效果, 对于高压大容量电机拖动运行场合节能效果尤为明显^[2]。在高压大容量电机调速场合, 串级调速系统以控制电压低、控制功率小、系统结构简单及节能效率高等优点展现出广阔的应用前景^[3]。串级调速系统中变流技术是实现系统平稳无级调速, 提高调速性能的关键。变流技术是指依据不同拓扑的变流器, 在精确的控制下, 实现能量形式变换(直流和交流间的转换)、相数变换、频率变换等^[4]。通过研究分

析变流技术, 实现串级调速系统节能调速, 对提高生产效率及节能减排起到重要作用。

1 串级调速系统的原理

串级调速系统是次同步电动状态下的双馈调速系统, 其结构如图1所示。

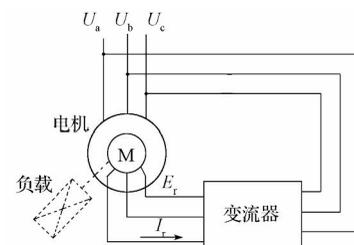


图1 串级调速系统原理图

Fig. 1 The principle diagram of cascade control system

图1中, M为绕线式异步电机。当绕线式异步电机处于电动状态时, 转子相电压 E_r 为:

$$E_r = sE_{r0} \quad (1)$$

收稿日期: 2011-10-04

作者简介: 张兴起(1984-), 男, 研究生, 主要从事港口大型电机节能控制系统的研究。

式中： s ——转差率； E_{r0} ——转子不动时的相电压，即转子额定相电压值。

式(1)表明转子电压的幅值与转差率成正比，此外转子频率与定子频率成正比，比例系数即为转差率 s 。转子短路时，转子相电流 I_r 表达式为：

$$I_r = \frac{sE_{r0}}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{r0})^2}} \quad (2)$$

式中： R_r ——转子单相绕组的阻值； X_{r0} —— $s=1$ 时的转子每相绕组漏抗。

由电机学可知，三相异步电机电磁转矩 T 为：

$$T = C_T \Phi_m I_r \cos \varphi_2 \quad (3)$$

式中： C_T ——与电机结构参数有关的常数； Φ_m ——电机主磁通，电机供电电压稳定时，近似为常数； $\cos \varphi_2$ ——转子功率因数(当电机稳定运行时，基本不变)。

由式(3)可知 $T \propto I_r$ 。当电机带有恒定负载时，可以近似认为无论转速高低，转子电流保持不变^[5]。电机在速度 n_1 下稳定运行，转子电流为 I_{r1} 。通过变流器在转子侧引入一个可控附加电压，使转子侧合成电压增大，转子电流和电磁转矩也必将增大(见式(2)式(3))。由于负载不变，电机加速。电机转速上升过程中， s 减小。由式(1)可知，转子相电压 E_r 随 s 的减小而减小，转子侧合成电压减小，转子电流和电磁转矩也减小。当电机达到预定的转速 n_2 时，转子电流仍为 I_{r1} ，此时，电机在新转速 n_2 下稳定运行。反之，可以使电机减速，从而实现调速的目的。

绕线式异步电机在次同步状态下的调速过程中，必然存在转差功率 P_s 。忽略机械损耗和杂散损耗， P_s 与电机转子电磁功率 P_m 关系式为：

$$P_s = sP_m \quad (4)$$

由式(4)可知，转速越低，转差功率越大。为达到节能的目的，必须把这部分功率回馈至电网或负载。但是转子侧的电压和频率与转速有关，无法与电网直接相连，因此需要通过变流器对电功率进行变换。在电能变换过程中涉及到功率因数、谐波等诸多因素。功率因数的大小直接关系到串级调速系统的效率，转子电流谐波则会引起电磁转矩脉动。由此可见，变流技术关系到整个串级调速系统的性能。

2 基于不同变流技术的串级调速系统

2.1 传统串级调速系统

为了使结构简单、系统稳定，传统的串级调速系统将转子电压转换成直流，通过变流技术提供一个可控直流电压来调节电机转速。引入的直流电压必须是

平滑可调的，同时能够吸收转差功率。系统如图2所示。

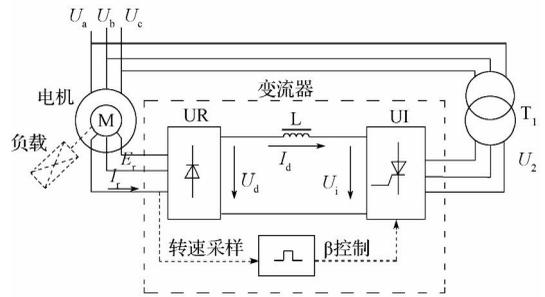


图2 传统串级调速系统原理图

Fig. 2 The principle of traditional cascade control system

图2中UR为三相不可控整流装置，输出直流电压 U_d ；UI为工作在有源逆变状态的三相可控变流装置，提供可调的附加直流电压 U_i ；L为平波电抗器； T_1 为逆逆变器； U_d 及 U_i 的极性及转子直流回路电流 I_d 方向如图中标注所示。

忽略电机转子绕组与逆逆变器绕组的内阻和换相重叠压降的影响，列出系统平衡方程式：

$$U_d = U_i + I_d R \quad (5)$$

$$\text{即 } K_1 s E_{r0} = K_2 U_2 \cos \beta + I_d R \quad (6)$$

式中： K_1 、 K_2 ——分别为UR和UI单元的电压整流系数， $K_1 = K_2 = 2.34$ ； U_2 ——逆逆变器的二次侧电压； β ——可控变流装置的逆变角，如果考虑换相重叠角的影响， β 最小值一般取 30° ； R ——转子直流回路的总电阻。

因为 I_d 与 I_r 成比例关系，而 I_r 又与转矩有直接关系，近似与转速无关，因此调节 β 值就改变了 s 值，即实现了调速。

尽管本系统实现了节能调速，但是因为变流器的拓扑及控制策略的因素，存在以下问题：

(1)通过调节 β 值实现电机调速， β 越大，转速越低，晶闸管逆变器产生的谐波越大，功率因数越低，降低了系统的整体效率。系统功率因数通常只有0.3~0.5，即使在高速满载情况下运行时，也不超过0.7。

(2)系统的频率比较低，电抗器L与逆逆变器 T_1 的容量比较大，增加了成本。

(3)系统机械特性比较软。

(4)转子侧整流单元采用二极管整流，由二极管工作特性可知，能量只能从转子侧流向电网，因此不能实现电气制动。

(5)如果UI单元中晶闸管换相失败，则逆变器输出电压与直流电动势将顺向串联并相互加强，由于回路电阻很小，将产生很大的短路电流，可能将晶闸管和变压器烧毁，称之为逆变失败或逆变颠覆。

2.2 高频斩波串级调速系统

高频斩波串级调速系统中晶闸管的逆变角固定为最小值 β_{\min} ,通过斩波器控制直流电压,完成节能调速。其原理图如图3所示。

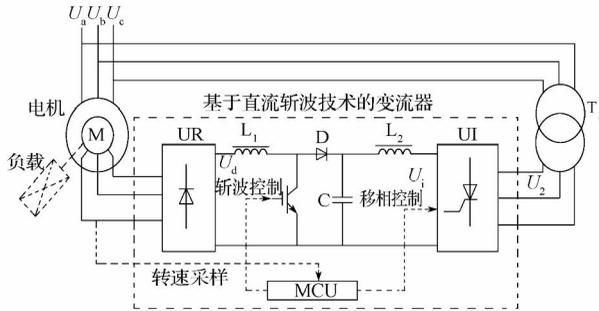


图3 高频斩波串级调速原理图

Fig. 3 Principle diagram of high-frequency chopped cascade control

图3中直流回路采用了以IGBT为开关的斩波器,电抗 L_1 起滤波作用,抑制转子的电流脉动,防止电磁转矩脉动。电抗 L_2 维持有源逆变装置的电流的连续,二极管D和电容C是缓冲电路。直流斩波器处于开关工作状态,IGBT导通时,逆变器输出的电压被短接;IGBT断开时,输出电压最大。设定斩波器的开关周期为 T ,在 τ 的时间里,IGBT闭合;在 $T - \tau$ 的时间里,IGBT关断。因为UR和UI均为三相桥式电路,整流桥输出电压 U_d 为:

$$U_d = 2.34sE_{r0} \quad (7)$$

逆变器输出附加直流电压 U_i 为:

$$U_i = 2.34U_2 \cos \beta_{\min} \quad (8)$$

斩波器两端电压平衡,可得:

$$U_d = \frac{T - \tau}{T} U_i \quad (9)$$

可以推导出:

$$s = \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \frac{U_2}{E_{r0}} \cos \beta_{\min} \quad (10)$$

由式(10)可以看出,通过改变IGBT导通时间 τ 的值就可以改变转差率 s ,实现电机调速。 τ 值越大,电机转速越高。在设计调速范围内,转速与斩波的占空比近似地呈线性关系,斩波控制的频率与精度越高,转速调整的精度越高。与传统串级调速系统相比,高频斩波串级调速系统具有以下优点:

(1)由于采用了高频斩波器,转子直流回路等效电阻大大减小,系统的机械硬度相应增加。

(2)晶闸管的逆变角被固定在最小值,功率因数得到提高,提高了系统效率,而且相应减小了逆变变压器的容量,降低了成本。

变流器的改进,大大提高了高频斩波串级调速系统的性能,但依然存在以下问题:

(1)由于UI单元中晶闸管的存在,最小逆变角使系统功率因数不高,同时逆变颠覆的危险依然不可避免。

(2)UR单元为功率二极管整流,能量只能单向流动,不能实现电气制动。

2.3 基于电压型PWM变流技术的串级调速系统

为了避免变流器中晶闸管带来的诸多问题,在有源逆变单元中用IGBT取代晶闸管,并采用PWM控制技术,其原理图如图4所示。此系统具备高频斩波串级调速及PWM整流技术的双重优势,可以使逆变器侧电流近似正弦,减小谐波;同时向电网提供容性无功,补偿串级调速系统产生的感性无功,提高功率因数。由于可控整流单元采用IGBT作为功率开关管,也克服了原有系统存在逆变颠覆的缺点。

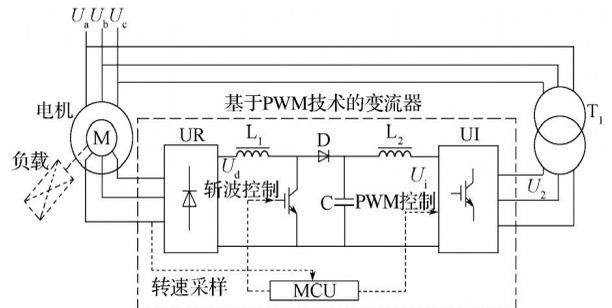


图4 基于PWM变流技术的串级调速系统原理图

Fig. 4 Principle diagram of the cascade control system based on PWM converter technology

PWM变流技术的应用,使系统在电机高速运行时总的功率因数达到0.9左右,在转差率 $s=0.3$ 时,功率因数依然高达0.8左右;逆变变压器的容量较小,大概只有电机额定功率0.3倍左右^[6]。系统通过斩波器来进行调速和匹配前后端电压。为了使电机能够在四象限运行,实现能量的双向流动,使串级调速系统成为真正意义上的双馈调速系统,将变流器中UR单元的二极管也更换为IGBT。采用了双PWM变流技术的串级调速系统容量大大减小,降低了成本,不仅可以实现次同步状态下的电机调速,还可以实现电气制动。与依靠自然停机和能耗制动相比,电气制动可使电机停机时间大大缩短,同时将轴上的机械能回馈到电网中,提高了系统的效率。但是IGBT在高压大功率场合的性价比还远不如晶闸管,而且控制系统比较复杂。因此采用双PWM变流技术的串级调速系统在应用上还受到限制。

2.4 基于矩阵变流器的串级调速系统

矩阵变流器是由电力电子开关组成的对称多相输入-多相输出网络的变流器。矩阵变流器不经过直流变换直接实现交-交变换(包括幅值、相位和频率),省掉了直流回路中笨重的电感器和电容器。其显著的优点是:功率因数高,输入电流为正弦波形,功率可以双向

流动,不产生亚谐波分量。与传统的基于整流-逆变器的电路相比,矩阵变流器有两个新特点:其一,不需要中间的直流变换;其二,允许瞬时的或持续的功率再生^[7]。基于矩阵变流器的串级调速系统原理图如图5所示。

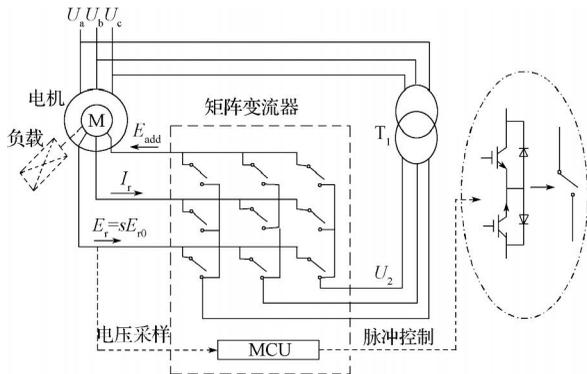


图5 基于矩阵变流器的串级调速系统原理图

Fig. 5 The principle diagram of cascade control system based on matrix converter

根据图5中标明的变量方向,写出转子电流 I_r 表达式为:

$$I_r = \frac{sE_{r0} \pm E_{add}}{\sqrt{R^2 + (sX_{r0})^2}} \quad (11)$$

式中: E_{add} ——矩阵变流器提供的可控附加电动势。

根据串级调速原理,改变附加电动势 E_{add} 就可以调节转速。控制系统根据电机工况,使能量实现双向流动,克服了传统串级调速系统不能实现电气制动的缺点。矩阵变流器是强迫换流的PWM交-交变流器,克服了采用自然换流的交-交变流器导致电机在低速区转矩脉动的缺陷。由于矩阵变流器没有自然续流支路,开关之间能否安全换流则是串级调速系统实现电机调速的关键因素。基于矩阵变流器的串级调速系统存在以下问题:

(1)开关较多,在高压大容量电机调速场合,开关损耗较大。

(2)转子相电压 E_r 的幅值和频率随转速实时变化,故较难控制矩阵变流器提供的可控电压 E_{add} 。

(3)矩阵变流器没有中间的直流变换,输入与输出直接耦合,故变流器抗干扰能力比较差,在调速过程中容易引起转矩脉动。

3 串级调速系统中变流技术的展望

串级调速系统属于转差功率馈送型调速系统,扣除转子的铜耗,转差功率通过变流器馈出或馈入。不管是馈入还是馈出,都成为有用的功率,所以变流器的效

率是实现电机调速节能的关键。因此,提高串级调速系统的高效性、稳定性和实用性,要着眼于研究变流器新拓扑,进一步简化、优化电路结构,减少变流器本身的损耗。新型电力电子器件的研发,对推动变流技术发展有巨大作用,例如IGCT和SiC等的研发^[8]。由于现有电力电子器件的开关损耗和其他限制,当变流器功率较大时,PWM控制的开关频率只能取较小的数值,而高开关频率是有助于增大功率密度和改善系统性能的。将ZCS、ZVS、ZCS PWM、ZVT PWM软开关变流技术引进串级调速系统,对提高开关频率、保护开关、减小损耗和促进调速系统稳定有重要意义。

随着科技的发展,对电机的调速要求越来越精密,经典的PI或PID控制器已经无法满足特殊系统的要求。与早期基于线性状态方程的情况相比,现代控制理论发生了巨大的变化。辨识与自适应控制、模糊控制、非线性解耦控制及滑模控制等智能控制,在快速响应、精度、稳定性、鲁棒性等方面有经典控制理论无法比拟的优势,尤其是DSP、ARM、FPGA等微处理器发展迅猛,为智能控制理论应用到变流器中提供了良好的平台。

4 结语

串级调速系统的发展与变流技术的进步密不可分,变流器的效率、性能直接关系到电机调速的节能效果和调速质量。通过对变流技术的研究,为串级调速系统的设计及应用提供理论依据。面对资源日益枯竭的危机,研发高效可靠的变流器,实现大功率电机节能调速有重要的社会和经济意义。

参考文献:

- [1] 郭燕,郭洪成,苏平. 电机串级调速技术的研发[J]. 科技情报开发与经济,2009,19(32):219-220.
- [2] 刘应诚. 风机、水泵调速运行节能原理及其调速装置的选择[J]. 液压气动与密封,2010,30(11):43-45.
- [3] 王玉彬. 电机调速及节能技术[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [4] 丁荣军,黄济荣. 大功率变流技术与应用(一)[J]. 变流技术与电力牵引,2007(5):9-15.
- [5] 陈伯时. 电力拖动控制系统——运动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [6] 郭建军. 串级调速系统的发展与展望[J]. 装备制造技术,2008(7):110-111.
- [7] 丁荣军,黄济荣. 大功率变流技术与应用(三)[J]. 变流技术与电力牵引,2008(1):2-10.
- [8] 钱照明,张帆. 中大功率变流技术的发展[J]. 变流技术与电力牵引,2007(6):2-7.