

[电缆]

压降计算对闭环控制的变频电动机供电电缆截面选择的影响

文/中国寰球工程有限公司 孙廷君 弓普站 李文婷 侯文娟 侯越峰

随着变频调速系统在化工项目中的使用越来越多，变频电动机的供电电缆的选用存在所选截面过大或者选用根数过多的情况。通过对变频调速系统各方面的分析，提出在0~50 Hz范围内电压降不必作为闭环控制的变频电动机电缆截面选择的限制条件，仅需电缆的载流量满足变频电动机额定电流的要求即可。

一般情况下，电力电缆导体截面的选择应满足GB50217-2007《电力工程电缆设计规范》

“3.7.1 电力电缆导体界面的选择，应符合下列规定：最大工作电流作用下连接回路的电压降，不得超过该回路允许值。”而根据GB50052-2009《供配电系统设计规范》“5.0.4 电动机端子处电压偏差允许值为 $\pm 5\%$ 额定电压”，也就是“ $95\%U_n \leq \text{电动机端子电压} \leq 105\%U_n$ ”，亦即供电电缆上的电缆压降应 $\leq 5\%U_n$ 。此规范的要求是针对正常的不采用变频调速异步电动机的要求。异步电动机端子电压为负偏差且绝对值较大时，负荷电流的增大以及起动转矩、最大转矩和最大过负荷能力的减小都很显著，严重时甚至不能起动或堵转；而当电压为正偏差且数值较大时，转矩增加，严重情况下，可能导致联轴器剪断，或者损坏设备。而在化工项目中，由于电动机离变电所距离远，电动机端子电压一般都为负偏差，按照电缆压降条件选择，在不采用变频调速系统时，电动机所选供电电缆必然根数多，截面大。

那么采用变频调速的电动机在调速的同时也要调压，特别是变频器在额定频率以下的调速时，输出频率高电压也高，输出频率低电压也低，电缆压降是否还要满足 $\leq 5\%U_n$ 呢？

裂解炉引风机电动机容量的选择

根据《钢铁企业电力设计手册（下）》23.4.1.1 离心式风机，离心式引风机其电动机功率计算式为

$$P = \frac{KQH}{\eta\eta_c} \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中， P 为电动机功率，kW； Q 为送风量， m^3/s ； H 为空气压力，Pa； η_c 为传动效率，直接传动时为1； η 为风机效率，约为0.45~0.75； K 为裕量系数，电动机大于5 kW时取1.15~1.10。

由式（1）可见，在引风机电动机功率选择时，要乘以裕量系数 K ，故引风机电动机的功率为1.15~1.10倍的需要的风机功率。

根据电动机功率计算公式： $P = \sqrt{3} UI \cos\varphi$ 可知，在考虑裕量系数为1.15~1.10，且在变频器的作用下电动机的运行电流保持不变的条件下，电动机端子电压达至电动机额定电压的87%~90.9%的情况下即可满足最大风力的要求。故在运行过程中，电动机端子一般要小于电动机额定电压。

变频调速电动机电压与速度的关系

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \approx -\dot{E}_1 \quad (2)$$

$$E_1 = 4.44NKf\theta \quad (3)$$

$$n = n_0(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s) \quad (4)$$

其中 $\dot{U}_1$ 为定子输入电压, $\dot{E}_1$ 为感应电动势, I_1 为定子电流, Z_1 为定子阻抗, N 为定子绕组匝数, K 为电动势常数, f 为电源频率, θ 为电动机主磁通。

由于在化工项目中裂解炉引风机的变频频率范围为 0~50 Hz, 本文仅讨论此范围内的变频调速。由式 (4) 可知电动机的转速与频率成比例, 这是变频调速的基础。如要提升电动机的转速, 需要提高电源频率, 根据式 (3) 可知, E_1 要升高, 故 $\dot{U}_1$ 为定子输入电压也要升高。

在变频调速的过程中, 为了保证电动机磁通和出力不变, 变频器的输出电流一般要维持在电动机的额定电流以下或接近额定电流。由于电动机输入电流基本保持不变, 可以近似认为电动机主磁通也基本不变。由式 (3) 可知, 变频器频率与感应电动势基本上成正比。

裂解炉的炉锁压力控制

变频调速闭环控制示意图如下图所示。

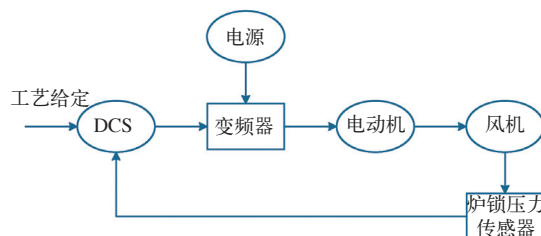


图 变频调速闭环控制示意图

裂解炉内压力通过引风机变频调速闭环控制的过程为: DCS 依照工艺要求设定某一炉锁压力 p , 并变换为变频器的速度给定 n , 变频器输出一定幅值的和频率的电压给电动机, 电动机获得一定的转速带动引风机使炉膛得到一定的压力。当受到某一扰动 (例如电动机端电压下降) 使得电动机转速 n 下降时, 炉内压力随之升高, 该压力变化通过炉内的压力传感器发送信号给 DCS, 经 DCS 的调节作用, 发送给变频器信号增加风机转速, 变频器随即提高输出频率和输出电压直到压力稳定。

由以上分析可知, 变频电动机在运行过程中电动机端电压和频率是一直处在不断变化的过程中, 且电动机端电压一直小于电动机额定电压 (由裂解炉引风机电动机容量的选择可知), 而且在 DCS 的调节作用下, 电动机端电压可以由变频器动态调整, 电压降损失由变频器输出电压升高得到补偿。故而电压降不必作为闭环控制的变频电动机电缆截面选择的限制条件。

计算实例

以下以爆炸危险环境内的 280 kW 变频电动机 (电动机数据见下表), 供电电缆长度为 650 m 为例。

表 变频电动机数据表

型号	功率 /kW	效率 (%)	功率 因数	额定电流 (380 V) /A	额定 转速 /(r/min)	同步 转速 /(r/min)
YBBP-4002-8	280	95.3	0.84	531.4	740	750

根据 GB 50058-2014《爆炸危险环境电力装置设计规范》中“5.4.1 6 2 节引向电压为 1 000 V 以下笼型感应电动机支线的长期允许载流量不应小于电动机额定电流的 1.25 倍。”电动机额定电流为 531.4 A, 温度系数和敷设系数分别取 1.08 和 0.65, 则电缆的载流量应该 $\geq (1.25 \times 531.4 / 1.08 / 0.65 \text{ A} = 946.23 \text{ A})$ 。

经查厂家资料, 单根 ZA-YJV22 0.6/1 kV $3 \times 185 \text{ mm}^2$ 的载流量为 410 A, 单根 ZA-YJV22 0.6/1 kV $3 \times 240 \text{ mm}^2$ 的载流量为 483 A, 为满足电动机额定电流的要求, 故采用 2 根 ZA-YJV22 0.6/1 kV $3 \times 240 \text{ mm}^2$ (载流量为 966 A) 并联或 3 根 ZA-YJV22 0.6/1 kV $3 \times 185 \text{ mm}^2$ (载流量为 1 230 A) 并联。

如按照一般电动机供电电缆的选择原则, 亦即供电电缆上压降 $\leq 5\% U_n$, 线路压降计算公式为

$$\Delta u\% = \frac{\sqrt{3}}{10U_n} (R'_0 \cos \varphi + X'_0 \sin \varphi) I l \quad (5)$$

选用 2 根 ZA-YJV22 0.6/1 kV $3 \times 240 \text{ mm}^2$, 计算结果如下

$$\Delta u\% = \frac{\sqrt{3}}{10 \times 0.38} (0.091 + 2 \times 0.48 + 0.077 + 2 \times 0.54) \times 531.4 \times 0.65\% = 9.92\%$$

选用 3 根 ZA-YJV22 0.6/1 kV $3 \times 185 \text{ mm}^2$ 计算结果如下

$$\Delta u\% = \frac{\sqrt{3}}{10 \times 0.38} (0.118 + 3 \times 0.48 + 0.078 + 3 \times 0.54) \times 531.4 \times 0.65\% = 7.42\%$$

由以上计算可知, 2 种选择在一般电动机供电电缆的选择原则下均不满足要求。而变频器启动引风机电动机时, 通常是低压低频启动, 启动时间长, 故而启动电流维持在额定电流附近。在引风机运行过程中也是从低速慢慢提速, 在运行到额定负荷时, 根据“裂解炉引风机电动机容量的选择”可知离心式引风机电动机额定负荷工频运行时端子电压一般运行在额定电压的 87%~90.9% U_n , 本例计算中额定电压为 380 V, 亦即额定负荷工频运行时电动机端子电压为

(下转第 58 页)

MOSFET模块桥臂，其中 S_1 、 S_3 为高压MOSFET， S_2 、 S_4 为低压MOSFET， V_1 、 V_2 为SiC二极管。

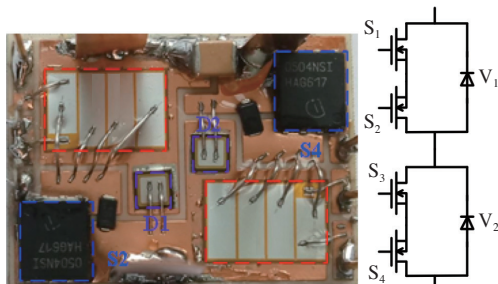


图6 裸芯片搭建MOSFET模块实物图

裸芯片搭建MOSFET模块双脉冲测试。在与分立元件搭建的MOSFET模块相同的双脉冲测试条件下，得到测试结果如图7所示。

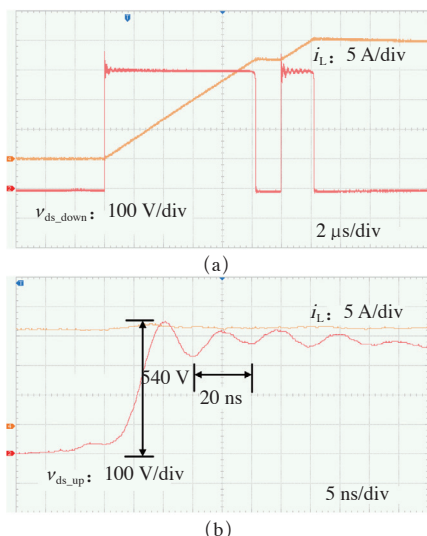


图7 裸芯片搭建MOSFET模块双脉冲测试波形图

从图7b可以看出，在下MOSFET模块开通时，上MOSFET模块过冲只有50 V，结电容与寄生电感谐振周期为10 ns，计算寄生电感为13 nH，与仿真结果相近。通过试验可以看出，裸芯片搭建

的MOSFET模块相比于分立元件搭建的MOSFET模块寄生电感减小了70%，提高了MOSFET模块的使用裕量，同时提高了MOSFET模块的可靠性。

3. 逆变器试验

为进一步验证组合管功能，本文搭建了以TEXAS公司F28069型DSP为核心的逆变器试验电路，并对逆变器效率进行了测试。图8为试验所搭建的半桥逆变器原理图。其中输入电压为400 V，电感 $L = 500 \mu\text{H}$ ，滤波电容 $C_3 = 50 \text{ nF}$ 。控制策略采用双极性SPWM调制方式，幅度调制比 $m_a = 0.65$ ，开关频率为50 kHz。

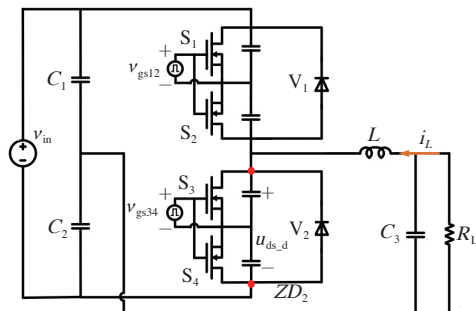


图8 半桥逆变电路图

结束语

本文提出了一种基于低成本Si基MOSFET和SiC二极管的组合器件结构，通过高压Si基MOSFET串联低压Si基MOSFET再并联SiC二极管的方式，解决了传统高压Si基MOSFET寄生体二极管在工作过程中反向恢复的问题。通过裸芯片搭建MOSFET模块降低了寄生电感解决了使用分立器件搭建MOSFET模开关过程中产生较高过冲的问题，降低了器件的电压应力，提高了可靠性。通过逆变器试验验证了组合器件功能、并测量了逆变器效率。EA

(收稿日期：2018.07.13)

(编辑：白文亭)

(上接第51页)

330.6~345.42 V。而在本例计算中，变频器的输出电压为380 V，电动机端电压 U_m 为

$$U_m = 380 \text{ V} \times (100\% - 9.92\%) \text{ V} = 344.698 \text{ V}$$

故即使在此时达到了9.29%，只要变频器输出电压保持额定电压，仍能满足电动机额定运行的电压要求。故而采用变频器调速时，亦即一般电动机供电电缆的选择原则不适用于变频调速电动机供电电缆的选择，只要采用2根ZA-YJV22 0.6/1 kV 3×240 mm²即可满足要求。

结束语

通过对乙烯裂解炉引风机电动机设计的研究，得到的结论如下：在0~50 Hz范围内电压降不必作为闭环控制的变频电动机电缆截面选择的限制条件。在本结论的指导下，可以极大地减少变频电动机供电电缆的截面和根数，缩减项目在电缆方面的投资。EA

(收稿日期：2018.07.18)

(编辑：白文亭)