

ACS800变频器DTC原理及在钻机中应用研究

介绍了ABB-ACS800交流变频器DTC的原理和特点。计算和实例表明,转矩取决于转速差 $n_1 - n_2$,且与 n_1 或 f_1 有关;比较SPWM和SVPWM,指出ABB采用SVPWM:优化组合空间电压矢量,插入零电压矢量或反向电压矢量并调整其作用时间,生成按 n_1 旋转的六边形或近乎圆形的磁链,获得给定转矩,实现调速。实例表明DTC具有快速响应和控制简洁的特点。同时具有广阔的发展前景,但仍有很多问题亟待解决。

黄冰/中石油川庆钻探工程有限公司川西钻探公司70082队

陈波/中石油川庆钻探工程有限公司川西钻探公司机械厂

0 引言

ZJ70DBS为数字化交流变频电动钻机,配备了7台不同功率的变频调速异步电动机。电动机的控制系统是Siemens的S7-300 PLC,驱动装置是ABB的ACS800-107-1160/1740-7柜式逆变单元,它是ABB新一代全数字高端交流变频器,采用DTC技术控制交流电动机。

1 DTC

1.1 DTC简述

直接转矩控制(DTC)是目前使用最广泛的交流调速控制技术之一。它跟踪定子磁链,调整定子电流,直接控制电动机的转矩,并着眼于转矩的快速响应,以获得高效的控制性能。

1.2 交流变频电动机

交流变频电动机是三相交流异步电动机,其电动机输出转矩公式为

$$T = kSR_2 U_A^2 / f_1 [R_2^2 + (SX_2)^2] \quad (1)$$

$(SX_2)^2$ 对转矩值影响小,则

$$T \approx kSU_A^2 / f_1 R_2$$

$$S = (n_1 - n_2) / n_1 \quad n_1 = 60f_1 / p \quad (2)$$

$$U_A = 4.44f_1 N_1 Q_m \quad (3)$$

式中, T 为转矩; S 为转差率; R_2 为转子每相绕组电阻; U_A 为定子每相绕组感应电动势; f_1 为定子电流频率; X_2 为转子每相绕组最大感抗值; n_1 为同步转速; n_2 为电动机转速; p 为极对数; Q_m 为旋转磁场通过单相绕组的最大磁通; N_1 为单相绕组匝数。

将式(2)代入式(1)得

$$T \approx 0.33kpN_1^2 Q_m^2 (n_1 - n_2) / R_2 \quad (4)$$

对交流变频电动机,为充分利用铁心,磁通 Q_m 应不变,根据式(3), U_A 正比于 f_1 ;根据式(4), T 近似正比于 $(n_1 - n_2)$,并与 f_1 或 n_1 有关。

1.3 应用实例

以一个实例来了解DTC的特点:图1为绞车A电动机悬持钻具,转速为0 r/min,司钻快速操作手柄至最大位置使绞车电动机加速至2 000 r/min,匀速运行,再快速操作手柄回零使电动机减速至0 r/min。

绞A电动机运转参数如图2所示,图2中:

1) AB段,电动机悬持,定子电流为直流,频率 f_1 为0,有电流,无电压($U_A = 0$),输出转矩为1 050 N·m,与负载平衡。

2) BC段,给定转速由0→2 000 r/min,逆变器根据当前实际转速、负载和加速时间等计算出给定转矩,在 $n_2 = 0$ 时,定子电流频率 f_1 瞬时由0升至 f_{12} , $n_1 - n_2$ 增加,电动机转矩瞬时由1 050 N·m升至给定转矩1 750 N·m。



黄冰/工程师

关键词/Keywords

变频器·

直接转矩控制·

空间电压矢量·

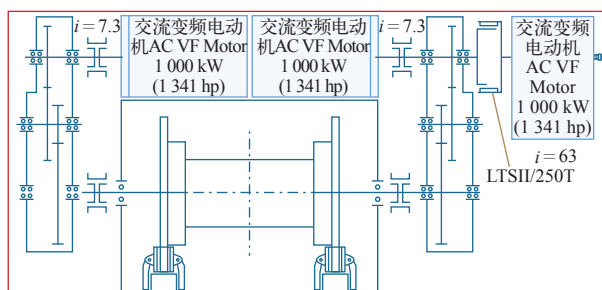


图1 绞车传动图

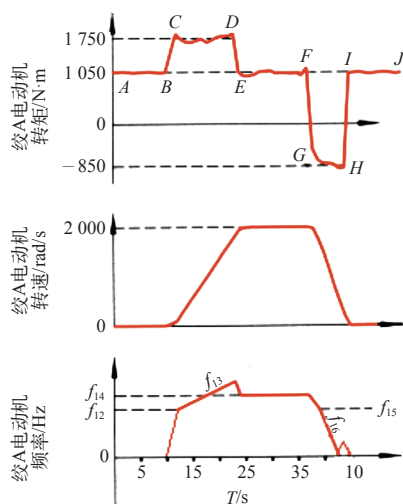


图2 绞A电动机运转参数

3) CD 段,电动机匀加速运行,随着 n_2 增加, n_1 或 f_1 相应增加, $n_1 - n_2$ 不变,电动机转矩保持 $1\,750\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

4) DE 段, n_2 达到给定转速 $2\,000\text{ r/min}$,变频器计算给定转矩为 $1\,050\text{ N}\cdot\text{m}$, f_1 瞬时降至 f_{14} , $n_1 - n_2$ 降低,电动机转矩瞬时由 $1\,750\text{ N}\cdot\text{m}$ 降至给定转矩 $1\,050\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

5) EF 段, n_2 不变,电动机匀速运行, f_1 保持 f_{14} , $n_1 - n_2$ 不变,电动机转矩保持 $1\,050\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

6) $FG \sim IJ$ 段,电动机给定转速由 $2\,000\text{ r/min} \rightarrow 0$,匀减速运行并悬挂,过程相反,分析类似。

计算及实例分析均表明: T 与 f_1 或 n_1 有关,且取决于转速差 $n_1 - n_2$ 。

1.4 原理简述

通过前述的分析,直接转矩控制是以转矩为控制对象,比较实际转速和转速给定值,并计算给定转矩,同时与实际转矩比较,调整 f_1 或 n_1 ,改变

$n_1 - n_2$,获得给定转矩,实现调速。如何调整 f_1 或 n_1 ,因各种原因,ABB并未公布相关方法,现根据目前常用的SPWM和SVPWM两种方法进行分析。

(1) SPWM

正弦电压波如图3所示,根据所需正弦电压波形包括频率控制IGBT的开关状态,并生成一系列等幅值不等宽的PWM矩形波,根据面积等效原理,其等效于图示正弦电压波。三组IGBT生成的PWM波一致,相位相差 120° 。由于 U_A 正比于 f_1 ,根据频率调整占空比就能改变 U_A ,因此就能对电动机输入一个三相变频的正弦交流电。这种方法本质上是调整输入电压频率 f_1 ,得到给定转矩,从而实现调速。

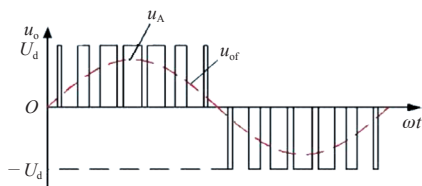


图3 正弦电压波

(2) SVPWM

SPWM未考虑电流波形,逆变器输出非正弦电流,导致电动机转矩脉动,为此需要逆变器输出近似正弦电流。

对工频电动机输入三相正弦交流电,在定子、转子间会形成一个圆形旋转磁链,其转速为 n_1 ,且输出转矩稳定。如果控制IGBT开关状态,生成类似磁链,且能改变其转速 n_1 ,那么:一方面逆变器输出近似正弦电流,减少转矩脉动;另一方面能调节转矩 T ,实现调速。这种方法叫空间(电压)矢量脉宽调制,简称SVPWM,ABB应采用此法。其中包括两个控制过程:①磁链轨迹控制,磁链幅值近似不变,给定与估算差值限制在容差范围内,磁链轨迹近似圆形;②转矩控制,通过改变 n_1 获得给定转矩,给定与估算差值限制在容差范围内。

IGBT状态如图4所示,每组IGBT有“1”和“0”两种状态,“1”代表上通下断,“0”代表上断下通。三组IGBT能组成8种工作状态,每种状态在电动机内合成一个电压,方向如图5所示,

之间相位相差 60° ，大小为 U_d 或0。这个电压被称作空间电压矢量，共8个，包括6个非零电压矢量 $U_1 \sim U_6$ ，2个零电压矢量 U_0 、 U_7 。

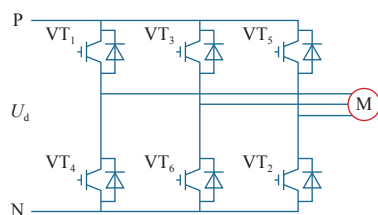


图4 IGBT状态

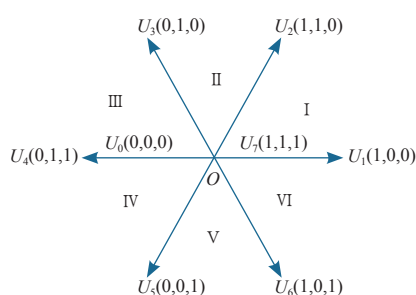


图5 合成电压矢量

当转速不太低时，磁链变量 $\Delta\Psi \approx UT$ 。

六边形旋转磁链如图6所示，观测磁链，根据 $\Delta\Psi_1$ 方向及大小选择 $U_1(1,0,0)$ ， U_1 作用 T_1 时间，磁链从 Ψ_1 旋转到 Ψ_2 ，旋转方向为该电压矢量方向，磁链变量为 $\Delta\Psi_1$ ；磁链旋转下一个 60° ，选择 $U_2(1,1,0)$ ，...，直至下一个周期，每个非零电压矢量工作1次。根据该计算模型，在一个周期内，三组IGBT按 $U_1 \sim U_6$ （即100，110，010，011，001，101）顺序及对应时间动作，生成类似PWM波输入，在电动机内形成六边形旋转磁链，线速度为 U ，也是定子端电压 U_A ，且 $U = U_A = U_i = U_d$ （ $i = 1, 2, \dots$ ）。

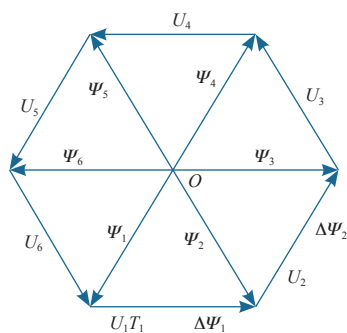


图6 六边形旋转磁链

$$U/|\Psi| = W = 2\pi n_1 = 2\pi \times 60f_1 / p \quad (5)$$

通过式（5）能计算出对应磁链转速 n_1 ，该 n_1 是定值。

随着旋转磁链幅值 $|\Psi|$ 的变化，轨迹呈六边形，与三相正弦交流电生成的圆形旋转磁链相差甚远，因此会导致转矩脉动。

为此将需要的电压矢量进行分解，由两个非零电压矢量合成，为保持磁链幅值 $|\Psi|$ 近似不变、轨迹接近圆形以及优化矢量组合，将这两个电压矢量按一定顺序和时间工作，电压矢量分解如图7所示。从 Ψ_1 到 Ψ_2 ，由 $U_6T_1/2$ 、 $U_2T_2/2$ 、 $U_6T_1/2$ 和 $U_2T_2/2$ 矢量合成， $T = T_1 + T_2$ （ T_1 为矢量 U_6 时间， T_2 为矢量 U_2 时间），下一个 60° 由另一组电压矢量合成。三组IGBT根据该计算模型动作生成类似PWM波，能在电动机内形成近似圆形的旋转磁链，其线速度为 $U_{\text{平均}}$ ，且 $U_{\text{平均}}T = U_6T_1 + U_2T_2$ 。如上所述 $U_{\text{平均}}$ 以及 n_1 也是定值，那么给定转矩发生变化或转矩波动超限，应如何调整。

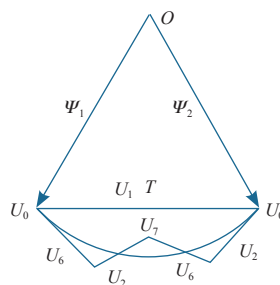


图7 电压矢量分解

方法一是插入零矢量。图7电压矢量分解，从 Ψ_1 到 Ψ_2 ，插入 U_0 、 U_7 ，由 $U_6T_0/4$ 、 $U_6T_1/2$ 、 $U_2T_2/2$ 、 $U_7T_0/2$ 、 $U_6T_1/2$ 、 $U_2T_2/2$ 和 $U_0T_0/4$ 矢量合成， $T = T_0 + T_1 + T_2$ （ T_0 为零矢量时间）， $U_{\text{平均}}T = U_6T_1 + U_2T_2 + U_0T_0/2 + U_7T_0/2$ 。由于 U_0 、 U_7 均为0，二者作用时磁链静止，因此插入零矢量不会影响磁链轨迹，但零矢量作用时间 T_0 可调整，从而改变 T 、 $U_{\text{平均}}$ 或 n_1 使转矩变化，实现调速。另外， $U_{\text{平均}}$ 也是定子端电压 U_A ，根据式（5）， U_A 与 f_1 同步变化。实例中BC段，给定转速改变，给定转矩增加，通过减少 T_0 、增大 $U_{\text{平均}}$ 或 n_1 以及增加转速差 $n_1 - n_2$ 实现；而CD段，匀加速运行，给定转矩不变， T_0 随 n_2 增加而减少，通过不断增大 $U_{\text{平均}}$ 或 n_1 保

持转速差 $n_1 - n_2$ 不变。

方法二是使用反向电压矢量（见图6），从 Ψ_1 到 Ψ_2 ， U_1 作用 T_1 后，施加反向的 U_4 作用 T_2 ，那么 $U_{\text{平均}}T_1 = U_1T_1$ 变为 $U_{\text{平均}}(T_1 + T_2) = U_1T_1 - U_4T_2$ ， T_1 、 T_2 均可调整， $U_{\text{平均}}$ 或 n_1 会迅速下降，转矩变化更快，从而实现调速。实例中FG段，给定转速改变需要急减速，给定转矩急速降低，通过反向电压矢量迅速降低 $U_{\text{平均}}$ 或 n_1 ，使转速差 $n_1 - n_2$ 降为负值实现。

上文阐述了如何组合矢量调整 n_1 改变转矩和保持磁链幅值不变。对转矩和磁链轨迹控制而言，当给定与估算差值超出容差范围时，变频器才调整；否则，不调整。实例中，在BC段突变、CD段加速或DE段突变时，给定与估算差值远超容差，变频器肯定要调整矢量组合；而在EF段匀速时，给定与估算差值可能小于容差，维持原矢量组合。

这种方法本质上是观测磁链，跟踪磁链轨迹，DTC原理如图8所示。变频器通过比较给定转速与实际转速，计算出给定转矩为2.13 N·m，与实际转矩1.08 N·m比较，根据给定磁链2.14与实际磁链2.15，确定给定磁链转速 n_1 （或者说确定 n_1 应如何调整），优化组合空间电压矢量，插入零电压矢量或反向电压矢量并调整其作用时间，控制逆变器工作，产生所需类似PWM波，生成按 n_1 旋转的六边形或近似圆形的磁链，获得给定转矩，再通过加速或减速最终获得给定转速。

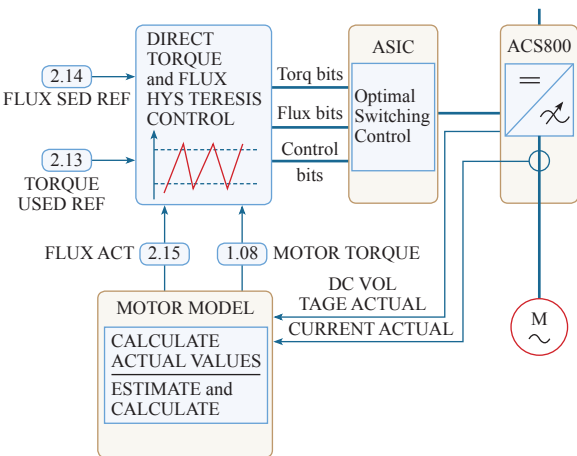


图8 DTC原理图

比较两方法，尽管SVPWM生成的波形与SPWM的PWM波形相似，但二者生成原理却大不相同：前者根据空间电压矢量作用顺序和时间生成，计算简便，适合数字化控制；后者根据所需正弦波生成，易于硬件电路实现，但殊途同归，均能生成可调频调压三相正弦交流电，从而实现调速。

1.5 DTC优越性

DTC优越性表现如下。

(1) 快速响应

以实例BC、CD和DE段为例，加速运行A电动机参数如下表所示。

表 加速运行A电动机参数

	时间	A转矩/N·m	A电流/A	A转速/(r/min)
BC段	11: 52: 28	1 032.195	313.3	-0.15
	11: 52: 29	1 828.936	362.6	91.725 02
	11: 52: 30	1 724.289	353.6	254.250 1
	11: 52: 31	1 666.02	334.1	410.775 1
	11: 52: 32	1 660.074	341	567.900 1
	11: 52: 33	1 695.749	275.6	717.300 2
CD段	11: 52: 34	1 727.857	258.8	870.225 2
	11: 52: 35	1 656.507	232.8	1 022.925
	11: 52: 36	1 711.209	307.5	1 187.55
	11: 52: 37	1 769.478	292.7	1337.4
	11: 52: 38	1 780.18	401.1	1 503.225
	11: 52: 39	1 789.693	440.5	1 650.675
	11: 52: 40	1 831.314	522.3	1 806.75
DE段	11: 52: 41	1 058.357	316.2	1 956.075

当BC段给定转速改变且DE段达到给定转速时，转子转速 n_2 几乎无变化，变频器计算并输出转矩达到了给定值约1 750 N·m和1 050 N·m；CD段加速运行， n_1 随 n_2 连续变化，输出转矩实时维持在给定值1 750 N·m附近，扭矩波动小。

上表中，数据采集时间为1 s。实际中，该变频器开环动态转矩阶跃响应时间为1~5 ms，用最快的速度就达到了给定转矩，这是直接转矩控制的精髓。在钻井现场，司钻操作绞车常会连续动作手柄，不断更改给定转速，在正、反转和加、减速间不断转换，要求速度迅速调节，转矩的快速响应是满足这一要求的前提。

(2) 控制简洁

1) 不同于矢量控制,它无须将交流电动机与直流电动机作比较、等效和转化,无须模仿直流电动机的数学模型,也无须为解耦而简化交流电动机的数学模型,省去了矢量旋转变换等复杂的变换与计算。它只是在定子坐标系下分析交流电动机的数学模型,所需要的信号处理工作比较简单,所用的控制信号易于观察者对交流电动机的物理过程作出直接和明确的判断。以ACS800逆变模块信号处理为例,电动机控制板RMIO接收PLC转速给定,变频器计算出给定转矩,生成空间电压矢量表,门极驱动板AGDR-5据此产生触发信号,控制IGBT开关动作,输出电流,获得给定转矩。

2) DTC跟踪定子磁链,只要知道定子电阻就可以观察出来,大大减少了矢量控制中控制性能易受参数变化的影响。

3) DTC采用空间矢量的概念来分析三相交流电动机的数学模型和控制各物理量,使问题变得简单明了。

4) 矢量控制通过控制电流等量来间接控制转矩,而DTC将转矩直接作为被控制量进行控制,强调的是转矩的直接控制效果。从实例看,其转矩获得主要是通过调整转差($n_1 - n_2$),而所需参数 n_2 、 $I_{\text{定}}$ 、 n_1 、 Q_m 、 U_d 和 T 都能直接测量、设定或计算,使控制过程简单、直观。

2 应用及发展

DTC技术的应用使钻机达到了现代化机电一体化的水平,电动机直接且分别单独驱动绞车、转盘和泥浆泵,不再使用庞大的柴油-并车箱传动装置,钻机传动结构非常简单;电动机可以在 $0 \sim 2\,000\text{ rad/s}$ 范围内任一转速运转,实现无级调速;悬持即零速时能输出满转矩,极大减少了盘刹的使用,操控更快捷、方便;对转速准确性要

求不高但工作环境恶劣的设备(如泥浆泵),能实现无速度传感器(编码器)运行。

DTC技术出现后,ABB声称21世纪是直接转矩控制技术的世纪,他们率先并相继推出了性能优异的ACS600、800和1000系列的DTC变频器,为DTC技术的应用与推广作出了贡献,DTC技术展现了广阔的发展前景。尽管如此,DTC仍有很多问题需解决:

1) 无速度传感器运行或在低速尤其是接近零速时,速度估算不准确。

2) 定子磁链观察主要取决定子电阻值,而该阻值在电动机运行时因发热而改变数值,这种改变在中高速时可以忽略不计,但在低速时会严重影响系统的性能,研究对定子电阻观察、补偿的方法对改善系统低速性能有重要意义。

3) DTC的关键是生成空间电压矢量表。

目前的技术在起动段和转矩给定有阶跃变化时,与正常运转期间精细调整时电压矢量的选择策略没有区别,因而全系统响应偏慢。因此在电压矢量的控制选择方面也有一定的研究意义。

参考文献

- [1] 北京ABB电气传动有限公司. ACS800固件手册系统控制程序7.x [G]. 2009.
- [2] 韩如成,潘峰,智泽英. 直接转矩控制理论及应用 [M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [3] 胡育文,黄文新,张兰红,等. 异步电机(电动、发电)直接转矩控制系统 [M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [4] 黄冰,陈波,高磊,等. ABB-ACS800系列变频器实际应用问题研究 [J]. 变频器世界,2015(2): 89-90.

(收稿日期:2015-11-06) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告