

专论

# 变频与工频的切换问题

(湖北宜昌市自动化研究所，湖北 宜昌 443000) 张燕宾

**摘要：**分析了低压变频调速系统中变频与工频切换过程中的暂态过程，根据不同负载暂态过程的特点，提出了不同的切换要领，并介绍了以风机和供水水泵为代表的具体切换方法。

**关键词：**变频与工频切换；电磁过渡过程；自由制动过程；差频同相；频率陷阱；切换时间

## 1 变频与工频切换的主电路

### 1.1 切换控制的提出

有的用户在采用变频调速拖动系统时，常常提出了变频器和工频电源进行切换的要求。主要有两种类型：

#### (1) 故障切换

部分生产机械在运行过程中，是不允许停机的。如纺织厂的排风机、锅炉的鼓风机和引风机等。针对这些机械的要求，在“变频运行”过程中，一旦变频器因故障而跳闸时，必须能够自动地切换为“工频运行”方式，同时进行声光报警。

#### (2) 多泵供水的切换

在多泵供水系统中，常采用由一台变频器控制多台水泵的方案。用水量较少时，由变频器控制“1号泵”进行恒压供水；当用水量增大，变频器的运行频率已经到达额定频率而水压仍不足时，将“1号泵”切换为工频工作。同时变频器的输出频率迅速降为0Hz，并切换至“2号泵”，使“2号泵”变频起动。

### 1.2 切换控制的主电路

#### (1) 主电路的构成

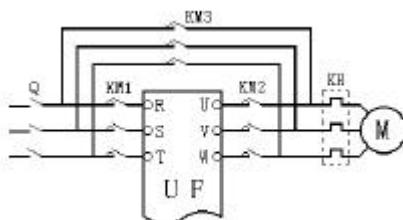


图1 切换控制的主电路

如图1所示，各接触器的功用是：

KM1 用于将电源接至变频器的输入端；

KM2 用于将变频器的输出端接至电动机；

收稿日期：2003-08-13

作者简介：张燕宾（1937-），男，江苏海门人，曾任宜昌市自动化研究所高级工程师、自动化研究所副所长、宜昌市科委驻深圳联络处主任、宜昌市自动化学会理事长、湖北省自动化学会常务理事，曾著《SPWM变频调速应用技术》、《变频调速应用实践》、《变频器应用基础》。

KM3 用于将工频电源直接接至电动机。

此外，因为在工频运行时，变频器不可能对电动机的过载进行保护，所以，有必要接入热继电器 KH，用于作为工频运行时的过载保护。

#### (2) 切换的动作顺序

切换时，应先断开 KM2，使电动机脱离变频器。经适当延时后合上 KM3，将电动机接至工频电源。

由于在变频器的输出端是不允许与电源相接的，因此，接触器 KM2 和 KM3 绝对不允许同时接通，互相间必须有非常可靠的互锁。所以，从 KM2 断开到 KM3 闭合之间的延迟时间是必须的，通常称为“切换时间”，用  $t_c$  表示。

当 KM3 闭合，电动机接至工频电源时，必须避免产生过大的冲击电流，干扰电网。这是本文讨论的关键问题。

## 2 电动机切断电源后的过渡过程

### 2.1 电磁过渡过程

#### (1) 定子绕组的自感电动势立即消失

KM2 断开后，电动机定子绕组中的电流及其磁场将立即消失，其能量消耗在 KM2 断开瞬间触点间的电弧上。因此，定子绕组的自感电动势将随着磁场的消失而消失。

#### (2) 转子绕组中存在衰减的直流电流

由于电动机的转子绕组是自成回路的，所以，转子绕组的自感电动势将阻止电流的消失。从而，转子绕组中的电流将有一个逐渐衰减的过程，它不再交变，其初始值取决于接触器 KM2 断开瞬间的转子电流值。

毋庸置疑，转子电流将产生一个逐渐衰减的直流磁场。

#### (3) 电动机处于同步发电机状态

转子是直流磁场，定子是三相绕组，这是同步发电机的基本组态。就是说，转子的直流磁场被定子绕组所切割，并在定子绕组中产生三相感应电动势。

有必要指出，这和异步电动机的再生状态（异步发电机状态）是不同的。异步发电机的定子绕组通常应和电源相接，以产生励磁电流。而在 KM2 断开后，定子绕组是开路的。

总之，异步电动机在切断电源后，存在着一个处于同步发电机状态的电磁过渡过程。

#### (4) 电动势的初始值

异步电动机在正常运行时，有两个基本情况：

根据电动势平衡方程，定子绕组反电动势的有效值是和电源电压十分接近的；

根据磁动势平衡原理，转子电流的磁动势和定子电流的磁动势也是十分接近的。

因此，在KM2刚断开的瞬间，由于转子电流的磁动势和磁通必将维持原值。所以，定子绕组电动势的初始值 $E_0$ 也将和电源电压十分接近。

在电磁过渡过程中，定子绕组电动势的衰减方程如下：

$$E = E_0 \cdot e^{-\frac{t}{t_E}} \quad (1)$$

式中， $E$ 为定子绕组电动势在 $t$ 秒时的有效值，V； $E_0$ 为定子绕组电动势的初始有效值，V； $t_E$ 为切断电源后的电磁时间常数，s； $e$ 为自然对数的底数。

定子电动势的衰减曲线如图2所示。

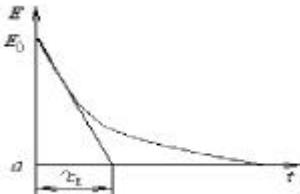


图2 定子电动势的衰减过程

#### (5) 电磁过渡过程的时间常数

准确地计算上述过渡过程的时间常数 $t_E$ 是十分困难的，我们作了一个粗略的实验：

将三个功率相同的灯泡（电压为220V）联接成Y形后和电动机（电动机容量为37kW）并联，如图3所示。合上开关Q，令变频器的输出频率上升至50Hz，使电动机在额定转速下空载运行，同时，灯泡HL在额定电压下正常发光。

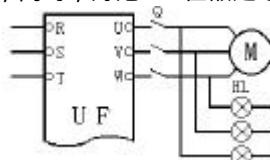


图3 发电时间的测量

切断开关Q，同时接通PLC的计时器。由于电动机处于发电状态的原因，灯泡HL将继续发光，但必将逐渐变暗，到灯泡HL完全熄灭时，令PLC停止计时。由此测出的时间为(1.77~1.8)s。又通过实验知，220V/40W的灯泡完全熄灭时的电压约为7V。考虑到电压越低，衰减越慢。因此推断，总的过渡过程约在2s以上。由于电动机在空转时惯性很大，2s内的转速下降十分有限，故可以粗略地认为，上述数据基本上表达了电磁过渡过程的时间。当然，具体数据将因电动机的容量而异，但应当在同一个数量级内。

按过渡过程的一般规律，过渡过程的总时间为时间常数的3倍左右。则电磁时间常数约 $t_E=0.6s$ 。

#### (6) 电动势在不同时刻的计算数据

按 $E=0.6s$ 计，则由式(1)，计算出定子绕组电动势在不同时刻的具体数据见表1。

上述数据与实验结果基本相符。这些数据表明，在切换时间小于0.5s的情况下，定子绕组电动势的作用是不能忽视的；而当切换时间大于1s时，定子绕组电动势所起的作用就可以忽略不计了。

表1 定子绕组电动势在不同时刻的计算数据

计算时间(s)	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0
$E/E_0(\%)$	84.6	54.9	43.4	18.9	3.57	0.07

## 2.2 拖动系统的自由制动过程

### (1) 自由制动过程的转速表达式

所谓自由制动过程，就是在没有任何制动措施的情况下，断电后拖动系统转速的下降过程。自由制动过程中，转速的基本表达式是：

$$n_t = n_{MN} \cdot e^{-\frac{t}{t_{NP}}} \quad (2)$$

式中， $n_t$ 为 $t$ 秒时刻的转速，r/min； $n_{MN}$ 为电动机的额定转速，r/min； $t_{NP}$ 为拖动系统机的机械时间常数，s。

时间常数 $t_{NP}$ 的大小主要和拖动系统的惯性(用飞轮力矩 $GD^2$ 表达)大小有关。在这方面，风机和供水水泵是两个具有代表意义的典型负载。

### (2) 一般负载的自由制动过程

不同负载的惯性大小的差异是很大的，例如，大容量风机的机械时间常数可达数分钟之久。其转速衰减曲线如图4所示。

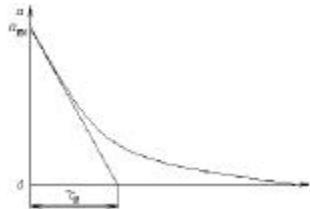


图4 一般负载的自由制动过程

根据式(2)，计算出时间常数不同的负载在不同切换时间的转速百分数见表2。

表2 时间常数不同的负载在不同切换时间电动机转速的百分数

拖动系统的机械时间常数(s)	切换时间 $t_c$ (s)				
	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
5	81.8%	74.1%	67.0%	54.9%	44.9%
6	84.6%	77.9%	71.6%	60.6%	51.3%
7	86.7%	80.7%	75.1%	65.1%	56.5%
8	88.2%	82.9%	77.9%	68.7%	60.6%
10	90.5%	86.0%	82.0%	74.0%	67.0%
15	93.6%	90.0%	87.5%	82.0%	76.6%
20	95.1%	93.0%	90.0%	86.0%	82.0%
30	96.7%	95.0%	93.5%	90.0%	87.5%
60	98.3%	97.5%	96.7%	95.0%	93.5%

### (3) 供水水泵的自由制动过程

在供水系统中，水泵在切断电源时，由于水的位能具有阻止水泵继续旋转的作用，如图5(a)所示。故电动机的惯性将很快被克服，停机十分迅速。根据实际测试所得到的数据，则供水水泵在切断电源后的停机时间约为2s或更长一些。

所以，供水系统中的水泵在自由制动过程中的时间常数只有(0.7~1.0)s左右：

$$t_{NP} \approx (0.7 \sim 1.0) \text{ s}$$

其转速变化曲线如图5(b)所示。

根据式(2)，计算出供水水泵在不同时间常数，不同切换时间的转速百分数见表3。



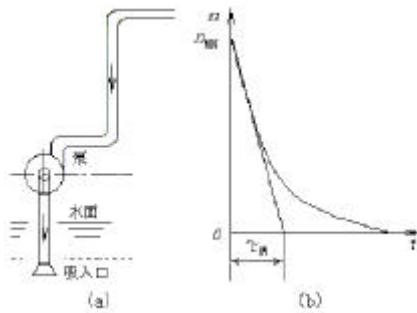


图 5 供水泵断电的转速变化  
(a) 水泵工况 (b) 转速变化

表 3 供水水泵在不同切换时间电动机转速的百分数

拖动系统的机械时间常数 $\tau_p$ (s)	切换时间 $t_c$ (ms)				
	50	100	150	200	250
0.7	93.1%	86.7%	80.7%	75.1%	70.0%
0.8	94.0%	88.2%	82.9%	77.9%	73.1%
1.0	95.1%	90.5%	86.0%	81.9%	77.9%
2.0	97.5%	95.1%	92.8%	90.5%	88.2%
3.0	98.3%	96.7%	95.1%	93.5%	92.0%
4.0	98.7%	97.5%	96.3%	95.1%	94.0%

### 3 切换瞬间产生冲击电流的原因

#### 3.1 转差过大引起的冲击电流

##### (1) 产生冲击电流的原因

如果在切换瞬间，电动机的转速已经下降得较多，则转子的实际转速与同步转速之间的转差较大，转子绕组切割旋转磁场的速度以及由此而产生的感应电动势和电流都较大，从而产生冲击电流，如图 6(b) 所示。图 6(a) 是切换前的情形。

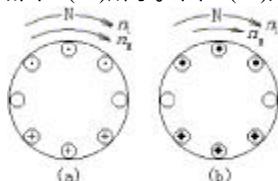


图 6 转差和电流的关系  
(a) 切换前 (b) 切换瞬间

##### (2) 对切换时间的要求

为了防止在切换过程中产生过大的冲击电流，要求在切换瞬间，电动机的转速  $n_c$  不要低于额定转速  $n_{MN}$  的 75%：

$$n_c \geq 75\% n_{MN}$$

根据上述要求，则：

一般负载见表 2，对于时间常数较短 ( $5s < \tau_p < 10s$ ) 的负载来说，切换时间最好控制在 1s 以内；而对于时间常数较长 ( $\tau_p > 10s$ ) 的负载来说，切换时间可以控制为 2s 或更长。

供水水泵，见表 3，由于时间常数很短，故切换时间一般应控制在 150ms 或 200ms 以内。

#### 3.2 定子绕组电动势引起的冲击电流

##### (1) 定子绕组电动势 $e$ 的波形特点

因为在切换瞬间，定子绕组电动势  $E$  已经有所衰减，所以，电动势的振幅值低于工频电压的振幅值；

转子的转速也已经有所降低，故电动势的周期大于工频电压的周期。定子电动势的波形与电源电压波形之间的关系如图 7 所示。

##### (2) 切换时刻对切换电流的影响

十分明显，如果在 KM3 闭合的瞬间，电源电压恰好与定子绕组的电动势同相，如图 7(a) 所示，则切换时将没有电流冲击；反之，如果在 KM3 闭合的瞬间，电源电压恰好与定子绕组的电动势反相，如图 7(b) 所示，则切换时必将形成很大的冲击电流。

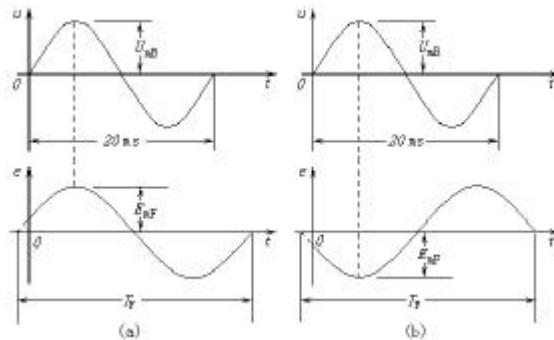


图 7 切换瞬间的电压波形

(a) 电压与电动势同相 (b) 电压与电动势反相

##### (3) 对切换时间的考虑

由上述，当系统所要求的切换时间远小于电动机的电磁过渡过程时，必须考虑定子电动势和电源电压的相位关系。这里，有关的因素如下：

切换瞬间的相位关系。如上述，只有在定子电动势与电源电压同相的瞬间，才是切换的最佳时刻。所以，切换控制十分关键的一个因素，便是如何“捕捉”到定子绕组电动势与电源电压的同相点。

##### 切换瞬间的频率差

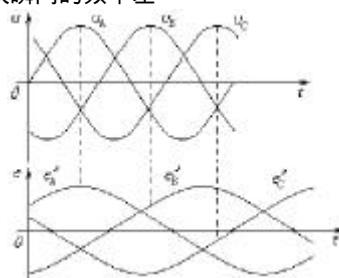


图 8 三相的相位情形

如果在切换瞬间，电动机的转速已经下降较多，则定子绕组电动势的频率也下降较多，周期较长。这时，虽然 A 相的相位对齐了，但其他相（如 C 相）的相位差较大，仍可能形成冲击电流，如图 8 所示。

综合上述，结合表 3 所示数据，并经实践证明，切换时间确定为 100ms，效果是比较好的。

### 4 风机的故障切换控制

风机常常用于车间通风、冷却以及锅炉鼓风等场合，一般不允许停机。因此，一旦变频器发生故障，要求能够自动地切换到工频电源上去，故称之为故障切换。

#### 4.1 故障切换的特点

##### (1) 切换瞬间的频率不定

因为风机的工作频率是由工况决定的，变频器发生故障时，究竟在多大频率下工作，是无法预知的。

所以，故障切换不可能考虑变频器输出频率与电源电压的频率和相位等关系。

##### (2) 风机的转速衰减缓慢

风机的惯性很大，其过渡过程中的时间常数一般都在数分钟以上。

#### 4.2 切换时间的选择

由于风机的机械时间常数较长，故选择切换时间的基本原则是：

(1) 切换应在电磁过渡过程基本结束后进行，为了避免电动机定子绕组的电动势和电源电压叠加的可能性，切换时间应大于电磁时间常数；

(2) 切换时电动机的转速不宜过低，由表 2 可知，在机械时间常数超过 30s 的情况下，在几秒钟内，其转速的下降是十分有限的。因此，切换时间在这里并不是主要矛盾。

重要的是风机在切换前的运行频率。显然，如果运行频率很低的话，当切换到 50Hz 的工频电源上去时，将因转差太大而产生冲击电流。

幸运的是，在实际工作中，风机的运行频率很少低于 40Hz 的。所以，如果该风机需要进行故障切换控制的话，变频器的下限频率以预置为 40Hz 为宜。

通常，风机的切换时间可设定为(2~3)s。今以 3s 为例，说明如下：

(1) 由表 1，电动机切断电源 3s 时，其定子绕组的电动势已经降至 0.07%，电磁过渡过程基本上已经结束；

(2) 由表 1，电动机切断电源 3s 时，电动机的转速下降幅度  $n\% < 5\%$ 。

#### 4.3 故障切换电路示例

##### (1) 控制电路的基本要求

运行方式的切换，操作人员既可以切换为变频运行，也可以切换为工频运行；

故障切换，在变频运行的过程中，一旦变频器发生故障，应能自动地切换成工频运行，并进行声光报警。

##### (2) 控制电路

满足上述要求的切换控制电路如图 9 所示，运行方式由三位开关 SA 进行选择。

当 SA 合至“工频运行”方式时，按下启动按钮 SF1，中间继电器 KA1 动作并自锁，继而使接触器 KM3 动作，电动机进入“工频运行”状态。按下停止按钮 ST1，中间继电器 KA1 和接触器 KM3 均断电，电动机停止运行。

当 SA 合至“变频运行”方式时，按下启动按钮 SF1，中间继电器 KA1 动作并自锁，继而使接触器 KM2 动作，将电动机接至变频器的输出端。KM2 动作后，KM1 也动作，将工频电源接到变频器的输入端，并允许电动机启动。

按下 SF2，中间继电器 KA2 动作，变频器的 FWD 与 CM 接通，电动机开始升速，进入“变频运行”状态。KA2 动作后，停止按钮 ST1 将失去作用，以防止直接通过切断变频器电源使

电动机停机。

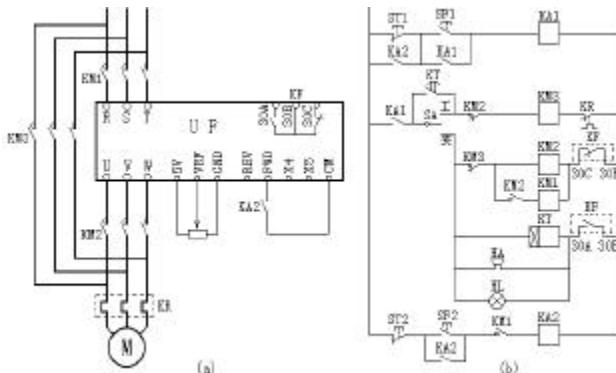


图 9 继电器控制的切换电路

(a) 变频器电路 (b) 继电器控制电路

在变频运行过程中，如果变频器因故障而跳闸，则：变频器的故障信号继电器“30B - 30C”断开，接触器 KM2 和 KM1 均断电，变频器和电源之间以及电动机和变频器之间，都被切断；与此同时，“30B - 30A”闭合，一方面，由蜂鸣器 HA 和指示灯 HL 进行声光报警。同时，时间继电器 KT 线圈得电，其触点延时（如延时 3s）后闭合，使 KM3 动作，电动机进入工频运行状态。

操作人员发现后，应将选择开关 SA 旋至“工频运行”位。这时，声光报警停止，并使时间继电器断电。

在变频调速正常运行时，如按下 ST2，则 KA2 断电，变频器的 FWD 与 CM 之间断开，电动机减速并停止。

#### 5 供水系统的“差频同相”切换控制

##### 5.1 供水系统运行切换的特点

###### (1) 变频器在切换前的工作频率接近于工频

在多泵供水系统中，常常采用由一台变频器控制多台水泵的方案。通常称为“1 拖 X”（由 1 台变频器控制 X 台水泵）。

“1 拖 X”的工作情况是：首先由变频器控制“1 号泵”运行；当用水量增大，变频器的运行频率已经达到上限频率（通常等于工频）时，如果在确认时间（通常为 2~5min）内，水压始终低于“目标压力”的话，则将“1 号泵”切换为工频运行。

同时，变频器的输出频率迅速降为 0Hz，并切换至“2 号泵”，使“2 号泵”变频起动，以此类推。

因此，其切换特点是：在切换瞬间，变频器的输出频率基本上等于工频。但因为计量上有差异的原因，以及电源频率也可能有波动，因此，绝对相等是很难出现的。

###### (2) 切换时电磁过渡过程远未结束

如上述，由于水泵转速下降较快，必须缩短切换时间。因此，在切换具体问题，电磁过渡过程远未结束，必须考虑定子电动势和电源电压的相位关系，切换时间以 100ms 为宜。

新疆电子设备厂在开发“BG - 1 电动机变频/工频自动转换监控器”（以下简称“自动转换监控器”）时，提出了“差频同相”的切换方法，并在进行了大量实验和测试的基础上，成功地解决了变频与工频的切换问题，生产出了专门用于捕捉最

佳切换点并执行切换动作的设备，可使切换瞬间最大电流的峰值不超过电动机额定电流的2倍( $I_m' = 2I_m$ )，取得了令人满意的结果，并通过了鉴定。今介绍如下：

## 5.2 差频同相的概念和实现

### (1) 差频同相的概念

要使变频器的输出频率与电源的工频频率完全相同，是十分困难的。如果在两者的频率之间保留一定差值( $\pm f$ )的情况下“捕捉”同相点，将容易得多。

由于是在频率不相等的情况下“捕捉”同相点，故称为差频同相。

差频同相的基本出发点是：当变频器的输出频率与电源频率存在差异时，两者的同相点之间将不断地作相对移动，如图10所示。这个特点，十分有利于“捕捉”到同相点。因此，差频同相的方法可使捕捉同相点的工作更加简单可靠。

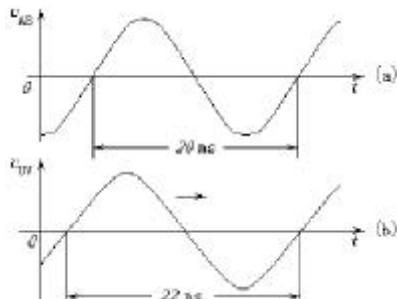


图10 同相点的相对移动  
(a) 电源电压波形 (b) 变频电压波形

### (2) 差频同相的实施

设置“频段陷阱”，图10表明，变频器与电源的频率差越小，则同相点之间作相对移动的速度越慢，“捕捉”同相点将越困难。

为此，“自动转换监控器”设置了一个“频段陷阱”( $50 \pm f$ )Hz。就是说，“自动转换监控器”要求在切换时，变频器的输出频率与电源频率之间应该有一个频率差 $f$ 。这可以通过预置变频器的上限频率来实现。例如，变频器的上限频率预置为49.6Hz，则 $f=0.4\text{Hz}$ 。

这个要求和供水系统的工作并不相悖。事实上，从节能的观点出发，变频供水时，工作在50Hz是并不可取的。因为，同样运行在50Hz下，变频运行比工频运行时的功耗要大一些。所以，把变频器的上限频率预置为49.5Hz或稍高一些是较好的选择，这正好为“频段陷阱”提供了条件。

### 切换的工作过程

当供水系统中变频器的运行频率达到上限频率，并且经过确认时间，确认需要切换时，供水系统将向“自动转换监控器”发出切换指令。“自动转换监控器”在得到指令后立即开始“捕捉”同相点。

当“捕捉”到同相点时，便断开KM2，并在延时100ms后，接通KM3，切换工作即告完成。

### 关于切换时间(100ms)

转速方面：由表2知，当KM2切断后100ms的瞬间，电动机的转速在额定转速的86.7%以上，满足切换转速不低于75% $n_{MN}$ 的要求；

相位方面：一方面，100ms是电源电压的5个整周期；

另一方面，按变频器的上限频率为( $50 - 0.5 = 49.5$ )Hz计算，其周期为20.2s；又按表2中的最坏情况( $M = 0.7s$ )计算，100ms时，电动机的转速为上限转速的86.7%时，则定子绕组电动势的周期是23.5ms。这里，周期的大小是随转速的下降而逐渐增加的。为简便起见，取5个周期的平均值20.86ms，5个周期的总时间为104.3ms。

就是说，电源电压与定子电动势之间，在5个周期内的时间差为4.3ms。在第5周期的相位差为：

$$\begin{aligned} &= \dots t \\ &= (2 \times 50) \times 0.0043 \\ &= 0.43 = 77.4^\circ. \end{aligned}$$

实际上，在大多数情况下， $M$ 的数值都大于0.7s，其值要小得多。

为了减小 $M$ ，在“捕捉”到同相点后，可适当增加一个提前量，如图11所示。则在切换瞬间(KM3闭合的瞬间)，将十分接近于同相点。

此外，因为第5周期 $T_5$ 与工频电压的周期 $T_0$ 之间的差别不大，故当其中一相的相位对齐时，其他各相的相位差也不会太大，如图12所示。

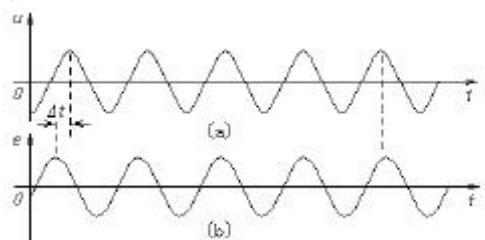


图11 差频同相时的瞬间压差  
(a) 电源电压的波形 (b) 定子电动势的波形

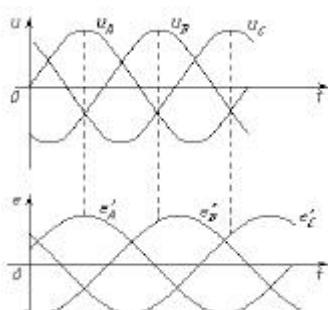


图12 三相的相位情形

### (4) 设置“频段陷阱”的注意点

**陷阱宽度** 陷阱越宽，则同相点的相对移动速度越快，捕获率越大，但在第5周期时的相位差也越大，可能产生较大切换电流的可能性也越大(见图8)；反之，陷阱越窄，则切换电流越平稳，但由于同相点的相对移动速度较慢，捕获率降低，甚至有可能捕获不到。实践表明，陷阱宽度 $f = \pm 0.5\text{Hz}$ 是比较适宜的。

**分辨率** 如果在陷阱区间内，出现两个或多个相位重合点时，应能准确地分辨出最佳的切换点。

**灵敏度** 捕捉同相点时必须解决好捕捉的灵敏度，就是说，必须能够及时地捕捉到同相点。