

# 大型异步电动机的暂态冲击电流及其抑制方法

晏国华 刘义和 叶秀丽 阿城继电器股份有限公司 (150302)

**【摘要】** 介绍了大型火电机组高压厂用母线切换时的情况,对大型异步电动机切换时的暂态过程进行了数学分析,介绍了减少切换时冲击电流的方法。

**【关键词】** 异步电动机 暂态过程 冲击电流

## 引言

近两年期刊发表了不少大型高压电动机保护的论文介绍与新品研制。这些文章都起到了信息交流、互通有无的积极作用。作者认为在被保护对象发生故障之前了解其暂态过程,尽力设法减少其故障出现,使之更加安全可靠,防患于未然也应予以重视。

## 1 厂用母线切换时的一般情况

厂用电母线电源由于某种原因消失时,由于其上接有异步电动机,而电动机绕组和电枢中原来积存的能量不可能立即消失,因此母线上的电压和频率不会随时间的推移而迅速衰减。对于高压大容量电动机和低压电动机来说,这种电压衰减是很不一样的,在低压电动机里由于磁场能量、机械惯量都很小,所以电压下降很快,一般经过数百毫秒(在大部分情况下甚至更短以至几乎觉察不到暂态电压和电流的存在)就能降至25%额定值以下,而此时合上备用电源所引起的非同期冲击电流不会很大。而在高压(大型异步)电动机里磁场能量、转动惯量大得多,再加上绕组的电阻比漏抗小得多,因此暂态过程中的自由电压和电流衰减得很慢,以至经过若干秒后依然会对母线产生影响,这样切至备用电源如果非同期合闸时则

定子绕组所承受的冲击电流会达到十几倍额定电流,而这种冲击电流对电动机可能产生的后果极其严重。

1.1 图1为望亭电厂12号主变冷却油泵电动机上所录下的电压衰减波形图。电动机为低压380V,13kW。由图可见,经过300ms残压即已衰减到额定电压的30%。

1.2 与上对照,高压电动机如给水泵的残压需经过4s才能衰减到约33%。

1.3 高压厂用电母线切换时母线电压与时间

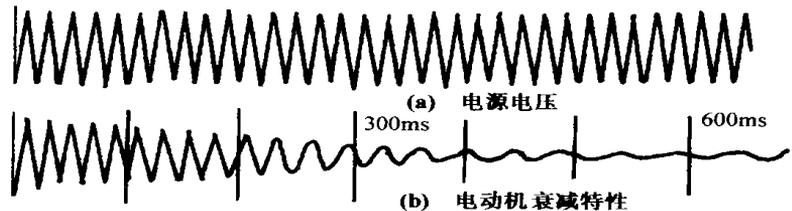


图1 低压电动机衰减特性

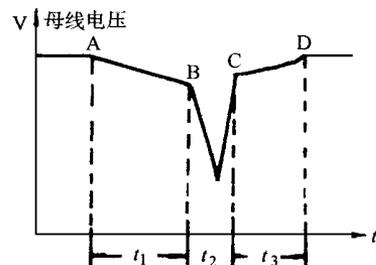


图2 母线切换时母线电压

图中:  $t_1$ ——保护动作的整定时间(判断时间)

$t_2$ ——电源切换时间

$t_3$ ——电压恢复时间

的关系可由图2说明之。

在  $t_1$  时间内,由保护装置判断出故障的性质,并决定自动切换装置是否应该动作。

如果引起电压降落的故障延续下去将对厂用机械的工作发生有害影响则备用电源应该由自动切换接入,  $t_1$  即  $AB$  段的时间一般可延至几秒, 具体视保护整定而定。

当电压下降到保护的整定值就必须进行切换, 这就是  $B$  点, 现在一般通用的方法是残压降至约 25% 时断路器投入, 因为此时引起的冲击电流一般能限制在允许范围以内。

$t_3$  即  $CD$  段为切至备用电源后的电压恢复时间,  $t_3$  的长短与很多因素有关。

厂用电动机在被降低了的电压下工作的总时间对应  $AD$  段即  $t_1 + t_2 + t_3$ , 如果持续时间过长时, 这些厂用电设备将被迫停机(或者无法自启动), 而机组的正常工况将受到影响。

L. E. Baker 等人在基里电站 2 台 145MW 机组上所做的试验表明, 厂用电源断路器切除后 10s 火焰已不能稳定燃烧。

对于更大容量的机组, 尤其是直流锅炉则更需要考虑该切换时间, 因为:

a 由于锅炉等用小口径鳍片管组成的膜式水冷壁, 向火面无绝缘材料, 油、风停止后重新恢复时必须考虑是否会引引起炉膛爆炸。

b 大型电动给水泵的启动时间很长(需 10s 以上) 而整个水冷壁系统的水容积很小(直流炉), 因此必须考虑切换过程中能否会引起锅炉断水爆管。

c 能否产生燃料中断, 会不会引起负压爆炸。

综上所述, 探讨缩小整个厂用电的切换时间而又设法把冲击电流限于允许范围对保证机组(特别是大型机组)的正常安全运行是非常重要的。而在总时间  $AD$  里, 关键是  $BC$  段即从电源拉开至重新合至备用电源的时间, 因为  $BC$  段的缩短也会大大地有利于厂用机械的自启动即能相应的缩短  $CD$  段的时间。

通常在一条高压厂用母线上都接有不同型号的带动不同辅机的电动机, 而各个电动机在切换时的暂态过程是各不相同的, 所以要对一组接到同一段母线上的电动机对此母线的影进行数学分析是极其困难的。现可改变一下方

法, 研究一台接在母线上容量最大、自启动时间最长、对母线影响最大的主要电动机(一般来说应该是给水泵电动机)的情况, 这样也可以基本上看出切换时母线上的暂态过程。

## 2 大型异步电动机切换时的暂态过程

### 2.1 暂态定子电压

据文献<sup>[1]</sup>介绍, 大型异步电动机的定子或转子电压的微分方程式如式(1)和式(2)所表征。

$$u_s = \frac{d\psi_s}{dt} + \left(\frac{r_s}{\sigma_s} + j\omega\right)\psi_s - \frac{L_m}{L_R} \frac{r_s}{\sigma_s} \psi_R \quad (1)$$

$$u_R = \frac{d\psi_R}{dt} + \left(\frac{r_R}{\sigma_R} + j\omega\right)\psi_R - \frac{L_m}{L_S} \frac{r_R}{\sigma_R} \psi_s \quad (2)$$

式中:  $u_s(u_R)$  —— 定子(转子)电压空间矢量  
 $\psi_s(\psi_R)$  —— 定子(转子)磁链空间矢量  
 $r_s(r_R)$  —— 定子(转子)绕组每相电阻  
 $L_S(L_R)$  —— 定子(转子)绕组每相电感  
 $L_m$  —— 定、转子间互感

$$\delta \text{ —— 漏磁系数, } \delta = 1 - \frac{L_m^2}{L_S L_R}$$

$\omega$  —— 电源角频率

$\omega$  —— 电动机轴角速度(频)

$\omega$  —— 电动机角频与电源角频之差

当电源切换时电动机从母线拉开, 定子电流  $i_s = 0$ , 但是电机内部的电磁能量不会突然消失, 即  $t = 0$  的切换瞬间, 气隙磁链仍然保持切换前的值。转子电流力图维持气隙磁链不变(只要转子绕组不开路), 该磁场在定子绕组中将感应产生电动势, 这就是定子开路反馈电压亦即我们所说的反馈电压或残压, 它的一般形式可用式(3)表征之。

$$V_M = u_s = \psi_s(0) [j(\omega - \omega(t)) - \frac{1}{T} e^{-\frac{t}{T}} \cdot e^{-j\omega(t)}] \quad (3)$$

式中:  $V_M$  —— 反馈电压或残压

$T$  —— 转子绕组每相的时间常数,  $T = L_R / r_R$

$\omega(t)$  表示  $\omega$  不是常数, 因为它是随时间衰减的, 其衰减规律取决于电动机的随行特性, 而对某一点机组随行特性总可以表示为

$\omega = f(t)$  的数学形式。

假设不计及转子转速及转子电流衰减对  $V_M$  的影响, 即假设  $\omega$  为常数, 则式(3)可表达为:

$$V_M = \Psi_s(0) [j(\omega_s - \omega) - \frac{1}{T}] e^{-\frac{t}{T}} \cdot e^{-j\omega t} \quad (4)$$

由于大型异步电动机的滑差率很小, 所以可以假定电动机是以同步转速运转即滑差频率  $\omega = 0$ , 又因为机械时间常数远大于电磁时间常数, 所以又可假设拉闸后一段时间内转速不变, 这样式(4)可进一步简化为:

$$V_M = \Psi_s(0) \cdot j\omega_s (1 + j\frac{1}{\omega T}) e^{-\frac{t}{T}} \quad (5)$$

式中  $\Psi_s(0) \cdot j\omega_s$  就是电动机拉闸前稳态时端电压的模, 令  $V_N = \Psi_s(0) \cdot j\omega_s$ .

因为稳态时  $\Psi_s$  矢量的模数是恒值, 所以  $\frac{d\Psi_s}{dt} = 0$ , 因此式(1)变为:

$$u_s = (\frac{r_s}{\mathcal{L}_s} + j\omega) \Psi_s - \frac{L_m}{L_R} \frac{r_s}{\mathcal{L}_s} \Psi_R = V_N$$

$V_N$  为稳态时定子端电压。

考虑到大型异步电动机的定子绕组电阻很小, 而且一般情况下  $\omega L_R \gg r_R$ , 意味着: 式(5)中  $j \cdot 1/\omega T \approx j \cdot r_R/\omega L_R \approx 0$ , 将此近似关系式代入式(5)可得出:

$$V_M = V_N e^{-t/T} \quad (6)$$

从式(5)式或式(6)都可得知:

$$\left. \frac{V_M}{V_N} \right|_{t=0} = [1 + (\frac{1}{\omega T})^2]^{1/2} = [1 + (\frac{r_R}{\omega L_R})^2]^{1/2} \approx 1$$

式(6)中的  $T$  即  $\frac{L_R}{r_R}$ , 即所谓的衰减时间常数其物理意义在于经过了时间  $T$ ,  $V_M$  的模将减少至  $1/e \approx 0.3679$ 。

按着关系式(6), 可以在复数平面上画出矢量  $V_M$  的图形, 如图3所示。

反馈电压的曲线为一对数螺线, 这是以始模  $V_M = V_N$  开始以角速度  $\omega_s$  顺时针方向旋转, 且以  $e^{-t/T}$  的速率衰减幅值。

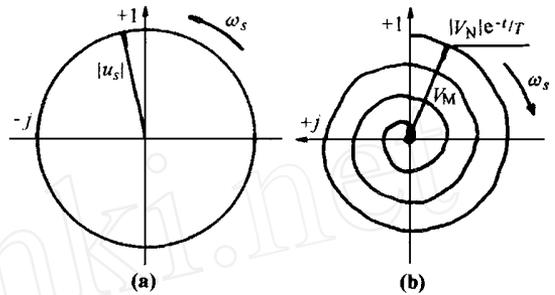


图3

- (a) 矢量母线电源电压(从电动机向母线侧观察)
- (b) 矢量电动机反馈电压(从母线向电动机侧观察)

### 2.2 差拍电压

当电动机从电源拉开(此时出现反馈电压  $V_M$ ) 又重合到主备用电源母线电压时(其矢量用  $V_B$  表示) 则作用于电动机定子绕组的电压矢量  $V$  决定于  $V_B$  与  $V_M$  之差, 即:

$$V = V_B - V_M \quad (7)$$

由于  $V_B$  和  $V_M$  的频率不同, 其差值为  $\omega$ , 又如前所述  $t = 0$  时  $V_M$  的幅模等于  $V_N$  即  $V_B$ , 而  $t > 0$  时  $V_M$  的幅模又以  $e^{-t/T}$  的速率衰减, 又如图5所示, 任一瞬间  $V_B$  与  $V_M$  的矢量差即为作用于电动机定子绕组上的电合成电压  $V$ 。

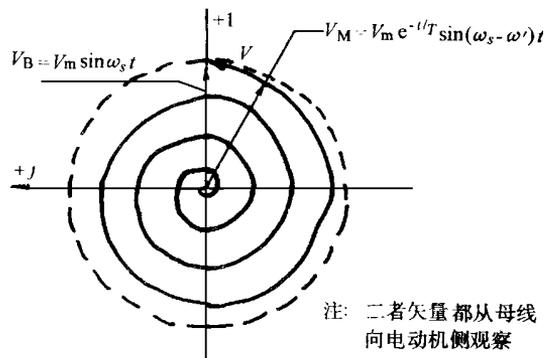


图4

为便于了解差拍电压  $V$  的特性曲线, 我们可以把  $V_B$  与  $V_M$  的极坐标系转换成直角坐标系, 则它们将分别为(仍假设  $\omega$  为常数):

$$V_B = V_m \sin \omega_s t$$

$$V_M = V_m e^{-t/T} \sin(\omega_s - \omega) t$$

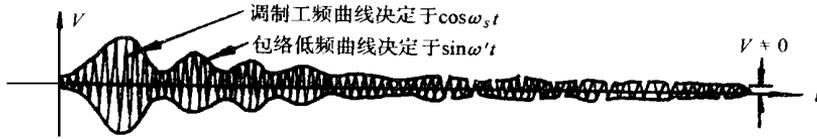


图5 差拍电压V的特性曲线

$$V = V_B - V_M = V_m [\sin \omega t - e^{-t/T} \sin(\omega - \omega') t] \quad (8)$$

重点是求出能够表征出差拍电压V的特性变化,可假设  $e^{-t/T} \approx 1$  的情况下高压备用母线快速投入,这样式(8)可转化为

$$V = V_m \cos \frac{\omega + \omega' - \omega}{2} t \cdot \sin \frac{\omega}{2} t \quad (9)$$

又因为  $\omega \ll 2\omega$ , 在  $\cos$  参量中可忽略不计,则上式可简化为:

$$V = V_m \cos \omega t \cdot \sin \Omega \cdot 5\omega t \quad (10)$$

依据式(10)可以绘制出如图5所示的曲线

从式(10)与图5可看出,差拍电压包含调制工频  $\cos \omega t$  部分和包络低频  $\sin \Omega t$  部分,并且须知:在大型异步电动机重合到高压备用电源母线电压上以后,反馈电压  $V_M$  将被拉入幅值近于母线电源电压  $V_B$  而且滑差频率  $\omega_s > 0$ , 即  $\omega$  越来越小,因此差拍电压V逐步变小但不可能变为0。

### 2.3 冲击电流

对于切换到备用电源母线上的异步电动机来说,我们更关心的是重合瞬间起定子绕组中的冲击电流而不是差拍电压,因为冲击电流过大将直接导致电动机发生损坏的危险。

为简化分析过程并保持其主要特性模式,我们可以假设定子、转子的电阻  $r_s, r_R$  为零,且近似地认为在电动机重合于备用电源的极短时间内其转速不变。这样,定子绕组中的冲击电流  $i_s$  可表达为

$$i_s = \frac{1}{\mathcal{L}_s} \left[ \frac{u_s}{j\omega} + (\Psi_s(0) - \frac{u_s}{j\omega}) e^{-j\omega_s t} - \frac{L_m \Psi_R(0) e^{-j\omega' t}}{L_R} \right] \quad (11)$$

由初始条件  $t = 0, i_s = 0$ , 代入式(11)可求出:

$$\Psi_s(0) = L_m \Psi_R(0) / L_R = L_m I_R(0)$$

$$\Psi_R(0) = L_R I_R(0)$$

将以上两关系式代入式(11),可得:

$$i_s = \frac{1}{\mathcal{L}_s} \left[ \frac{u_s}{j\omega} + (L_m I_R(0) - \frac{u_s}{j\omega}) e^{-j\omega_s t} - L_m L_R(0) e^{-j\omega' t} \right] \quad (12)$$

令  $P = u_s / \mathcal{L}_s \omega, Q = L_m I_R / \mathcal{L}_s$ , 则式(12)可变成:

$$i_s = -jp + (Q + jp) e^{-j\omega_s t} - Q e^{-j\omega' t} \quad (13)$$

由式(13)可见,  $i_s$  空间矢量由三部分组成,它们的矢量关系如图6所示。

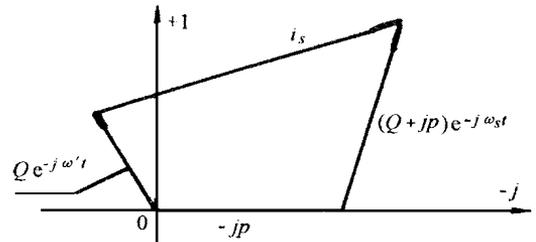


图6  $i_s$ 的矢量关系图

由图6可见,  $i_s$  矢量在空间亦是旋转的,但是其始端以  $\omega$  的角速度顺时针方向旋转,而其末端却以比  $\omega$  大得多的  $\omega'$  的角速度顺时针方向旋转,因此矢量  $i_s$  的始末端的旋转轨迹分别为两个圆。下面用作图法作出其始末端转迹。

作图7,在其复数平面上置  $u_s$  于实轴,以原点O作中心,  $Q$  为半径作轨迹圆,其角速度为  $\omega$ , 顺时针方向旋转。在虚轴上取  $-jp$ , 则O点为  $i_s$  末端轨迹圆的圆心,其半径为  $(Q + jp)$ , 角速度为  $\omega'$ , 旋转方向亦为顺时针。矢量  $Q$  和矢量  $(Q + jp)$  的交点a为备用电源母线与拉开的异步电动机定子快速切换(重合)瞬间开始的时间  $t$  的始点 ( $t = 0$ ), 显然此时  $i_s(0) = 0, t > 0$  以后,  $i_s(t)$  从a点沿以O为中心的大圆圆周伸展,其始末端分别以O、O'为中心,以  $\omega, \omega'$  为角速度旋转,其幅值增至最大,又减至最小,如此往复循环。

须知, 由于母线电压  $u_s$  是个常数, 所以矢量  $P$  的幅模, 即  $P = u_s / \tilde{\Delta}_s \omega_s$  也是个常数; 但是实际上转子电流  $I_R(t)$  只有在合闸瞬间它等于  $I_R(0)$ , 此后  $I_R(t)$  随着  $\omega(t)$  逐步变小 ( $\omega > 0$ ) 而变小, 所以  $Q = L_m I_R(t) / \tilde{\Delta}_s$  亦随之变小, 以致于  $(Q + jP)$  与  $i_s$  的系列模值亦逐渐变小。此外, 合闸瞬间  $I_R(0)$  与  $u_s$  的相角差  $\theta$  是随着  $Q$  以  $\omega$  角速旋转而变化的, 而矢量  $(Q + jP)$  的幅模所决定的  $i_s$  末端圆的半径也要随点  $a$  的位置 ( $i_s$  的始端) 变化而变化:  $\theta = \pi/2$  即  $Q$  与  $+j$  轴重合时, 半径  $(Q + jP)$  为最大值, 而  $\theta = -\pi/2$  时, 即  $Q$  与  $-j$  轴重合时, 半径  $(Q + jP)$  为最小值。

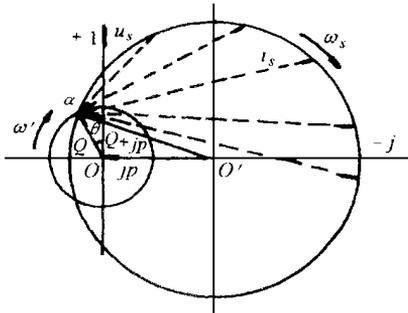


图7 重合时  $i_s$  的旋转轨迹

### 3 减少冲击电流的方法

当前采用的方案主要是具有检查同期的性能, 它测量  $V_M$  和  $u_s$  间的相角差与频率差, 使合闸时的相角差和频差都在容许范围内, 以限制

冲击电流值。

这种方案的最大优点在于它有可能构成所谓的瞬时切换, 使得切换时的断电时间只限于断路器本身的合闸与跳闸的时间差, 由于工作母线刚切除的一段很短时间内  $V_M$  和  $u_s$  之间的相角差还几乎没怎拉开, 所以只要有快速断路器 (如合闸时间为 0.1s), 则这样切换常常可以获得成功。

该方案很容易采用微处理器或单片机实现测量相差和频差及有关逻辑判断功能, 达到高压厂用母线快速切换的目的。

### 4 结论

4.1 当异步电动机从电源拉开后, 又重合到备用电源时, 在定子绕组上必将产生差拍电压即  $V = V_B - V_M$ , 它的特性曲线可近似地表征为调制工频曲线  $\cos \omega t$  与包络低频曲线  $\sin \omega' t$  之积。

4.2 冲击电流由三部分组成  $i_s = -jP + (Q + jP)e^{-j\omega_s t} - Qe^{-j\omega t}$ , 它的矢量旋转轨迹是由两个圆周、两种频率合成, 在许多文献上很少见到。

#### 参考文献

- 1 Baker L E, Huse R A, Taylor D W. Transfer tests on station auxiliary busses. Power Apparatus and Systems. 1956
- 2 杜玉书. 大型异步电动机从电源拉开再重合. 1978

## THE TRANSIENT OF THE LARGE SIZED ASYNCHRONOUS MOTOR

Yan Guohua et al (Acheng Relay Works, 150302, Heilongjiang, China)

**Abstract** When the HV station service bus is switching, the transient of the large sized asynchronous motor is analyzed and a method of inducing the impulse current is introduced

**Keywords** asynchronous motor transient impulse current