高压电机的操作过电压及其保护*

陈 荣　　邱达人
(盐城工学院电气工程系,盐城,224003　盐城化纤厂,盐城,224003)

摘 要 分析了高压电机在实际使用过程中所产生的操作过电压及其危害,提出了抑制高压电机操作过电压的方法。

关键词 电机　过电压　保护
分类号 TM34

大中型高压电机广泛应用于风机、水泵、压缩机、破碎机、粉磨机等机械设备中,由于其电压等级高(3000V、6000V、10000V),功率大(几百～几千千瓦),故对其进行启动、停止的控制一般使用高压开关设备,如:油断路器、真空断路器等。正因为如此,在实际操作过程中不可避免地会引起一定数值的过电压。而高压电机使用的场合都是现场比较重要的部位,或是现场设备投资比较多的部位,电机能否正常运行,是这些设备或整个生产过程正常生产的必要条件。某水泥厂粉磨车间的球磨机,∅2.2m×6.5m,其电机功率为380kW,电压为6000V,自从投产以来,平均2～3个月有一台磨机的高压电机被击穿损坏,现场工人十分恼火,却又无可奈何,既影响了生产,又多花了维修经费。为解决这个问题,我们先分析电机击穿损坏的原因,再寻求解决的方法。

1 电机使用过程中的操作过电压及危害

1.1 断路器分断电动机时过电压分析

断路器切断电动机时,如将其看成是感性负载,这将在电机端口产生过电压,但因电动机的参数会随转差率而变,过电压稍有变化,且开断空载状态的电动机与开断制动状态的电动机,其过电压相差也很大。使用断路器的型式不同,在电机端口产生过电压的机理也有差别。使用少油断路器开断电动机时,将在电机端口产生截流过电压;用真空断路器开断电机时,除截流过电压外,还产生三相同时开断过电压和高频重燃过电压。

1.1.1 截流过电压

在断路器开断电动机时,会产生截流过电压,其物理过程与开断一般电感负载时一样,但要考虑电动机转差率的影响。断开空载运行的感应电动机的过程见图1。图中$\varnothing_{10}(L_{10})$,$\varnothing_{20}(L_{20})$分别为电动机定子和转子绕组的漏磁通(漏感),$\varnothing_{12}$为主磁通,e_2为转子绕组的转差电势。在空载时,转差率约1%,故$\varnothing_{20}$,i_2、e_2很小。断路器开断后,转子因惯性而继续旋转,转子绕组在开关断开后磁链不能突变,从而产生一电动势和电流,此电流所产生的磁场相对于定子来说是旋转的,使得定子绕组的端电压仍能基本按原来工频电压的规律变化。该旋转磁场及定子感应电压的幅值将按指数规律衰减,时间常数取决于定子转子的励磁电感及其损耗电阻的比值。由于定子绕组有感应电势存在,从而降低了开关触头间的恢复电压。

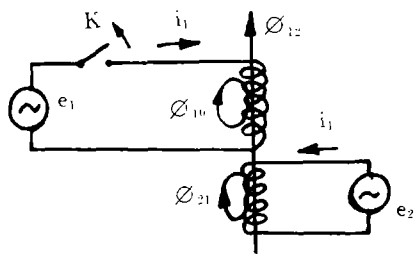

图1 断开空载电动机示意

断路器在I_0时截流,定子绕组开路无电流,于是$\varnothing_{10}$突变为零,定子漏抗L_{10}在截流时所储存的磁能将转变为绕组端部对地电容C的电能,产

* 收稿日期:1998－06－26

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

生振荡电压，振荡频率一般在千赫以上，当在图2所示位置截流时，电动机的等效电路如图3所示。

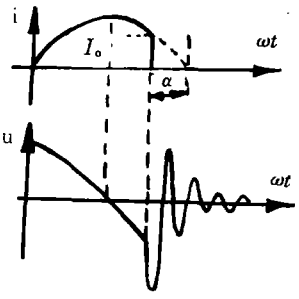

图2 截流示意图

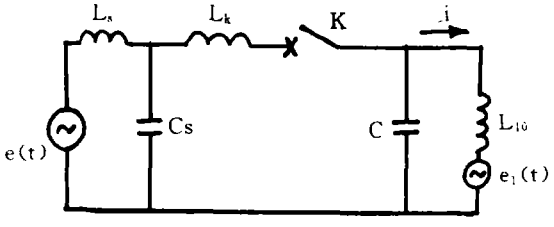

图3 电动机等效电路

其中Ls为电源等值电感，Cs为母线对地杂散电容，L_k为母线至电动机联线电感，K为断路器，L_{10}为定子漏感，C为电动机定子端对地等值电容，$e_1(t)$为定子感应电压，近似为工频。

相对于工频而言，C可略，则C两端的电压在定子绕组感应电势$e_1(t)$作用下有$U_c'=e_1(t)=-E_m(\cos\omega t+\alpha)$，$E_m$为电源电压幅值。

在断路器断开情况下，电路有：$U_c=L_{10}\cdot di/dt$，$i=-C\cdot dU_c/dt$

则有：$L\cdot C\cdot d^2U_c/d^2t+U_c=0$

初始条件：$U_c(0)=U_o$，$C\cdot dU_c/dt|_{t=0}=-I_o$

解得：$U_c''=-U\cdot\cos\omega_o t-I_o\cdot\sqrt{L_{10}/C}\cdot\sin\omega_o t$，$\omega_o=1/\sqrt{L_{10}C}$

利用叠加定理：

$$Uc=U_c'+U_c''=-E_m\cdot\cos(\omega t+\alpha)-U\cdot\cos\omega_o t-I_o\cdot\sqrt{L_{10}/C}\cdot\sin\omega_o t$$

最大可能幅值电压为：

$$U_{cm}=E_m+\sqrt{U_o^2+I_o^2\cdot L_{10}/C}$$

若断开空载电动机，流过断路器的电流是电动机的空载电流，约25%～30%Ie，而产生过电压的电感是电动机的漏感，所以，断路器截流时，定子漏感储能不大，过电压也就不高。

若断开制动状态的电机，特别是刚启动时继电保护动作，要切除电动机时，由于转子转速接近于零（或转差较大），转子绕组相当于短接的变压器二次绕组，有很大的短路电流i_2，定子绕组中电流i_1为启动电流，$i_1=i_2'+i_o$，其中i_o为激磁电流，i_2'为转子折算到定子侧的转子电流。通常启动电流为5.5～6.5倍额定电流，所以当$i_2\gg i_o$，则$i_1\approx i_2'$，从而断路器的截流值可能很大。再者，开断制动状态的电动机时，除考虑定子绕组的漏感L_{10}外，还要考虑转子绕组漏感L_{20}，设L_{20}'为转子L_{20}折算到定子侧的漏感，则在计算截流后电动机的储能时，应用总的漏感$L_{10}+L_{20}'$。从而，开断制动状态下的电动机的磁场储能要比开断空载运行电动机时大得多，过电压也较高。计算式为：

$$U_2(t)=-U_o\cos\omega_o t-I_o\sqrt{L_{10}+L_{20}'/C}\sin\omega_o t$$

$$\omega_o=1/\sqrt{(L_{10}+L_{20}')C}$$

式中：$U_o=E_m\cos\alpha$，$I_o=I_m\sin\alpha$

$$U_m=\sqrt{E_m^2\cos^2\alpha+I_m^2\sin^2\alpha(L_{10}+L_{20}')/C}$$

过电压一般都超过电动机额定电压的2.5倍以上，甚至达到额定电压的6倍。

1.1.2 高频重燃过电压

现场高压电动机的控制大多数使用真空断路器，真空断路器在被切断电流很大但并不发生截流时，会出现多次重燃，它可形成幅值很高的重燃过电压。

假定真空断路器在工频电流过零时熄弧（无截流），此时电源相电压为E_m，熄弧后被切电动机侧的电压为：

$$U=U_o\cos\omega_o t-I_o\sqrt{(L_{10}+L_{20}')/C}\cdot\sin\omega_o t$$

式中：$\alpha=0$，$I_o=0$，$\omega_o=1/\sqrt{(L_{10}+L_{20}')/C}$

$$=E_m\cos\alpha\cos\omega_o t=E_m\cos\omega_o t$$

其波形如图4曲线1所示，ω_o是电动机漏感与杂散电容C组成的振荡电路的角频率，相对于工频而言极高，故讨论重燃过电压时可将电源电压维持在E_m不变。真空断路熄弧后，触头间恢复强度的包线以E_m为基线，在图中用曲线4表示。熄弧瞬间$t=0$，电感L中的电流$i_1=0$，接着电容C向L放电，开始振荡，触头间出现恢复电压U_h，$t=t_1$时，$i_L=I_{L1}$，$U_h=U_{h1}$，此时，恢复电压等于恢复强度，发生第一次重燃，出现高频振荡，其振荡频率决定于断路器两侧电容及其连线等值电感，它比ω_o要高得多，振荡衰减的稳态值是趋于电源

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

电压 E_m，振荡电压第一次到达最大值 U_1 时，$t=t_1$，$U_1=E_m+U_{h1}$，高频振荡电流第一次过零，再次熄弧。在 $t_1\sim t_2$ 的极短时间内，i_L 保持 I_{L1} 不变，I_{L1} 虽然数值不大，但已不是开断电动机时的零值。在 t_1 之后，电动机侧电压变化如图曲线 2 所示。在 t_2 时再次重燃，振荡电路最大电压：$U_2=E_m+U_{h2}$，电感电流增大至 I_{L2}，t_2 时又熄弧。以此类推，振荡过程愈来愈强烈，故在多次重燃后，过电压可达极高的幅值。实际可达到额定电压的 5 倍以上，频率可达 $10^5\sim10^6$Hz，陡度极大，对主绝缘和匝间绝缘有严重的危害。在这种多次重燃过程中，I_L 的增大，相当于等值截流不断增大，其结果是使最大等值截流比真空断路器工频截流值要大得多，因此过电压也很高。

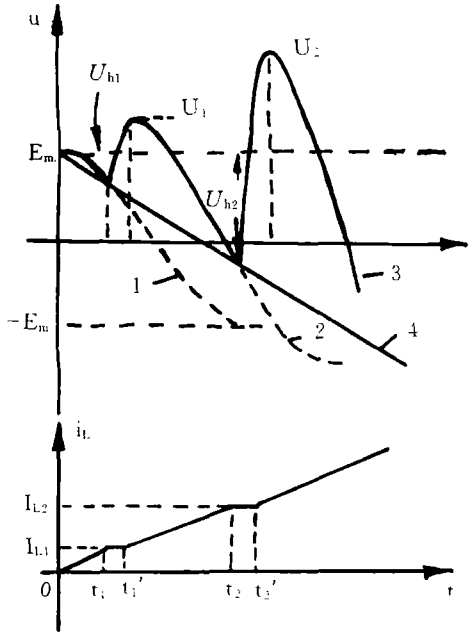

图 4　重燃过电示意

1.1.3　高频重燃而产生的三相同时开断过电压

使用真空断路器时，还会出现三相同时开断现象。这是由于电动机一般通过三相电缆与电源连接，在电缆芯线间有相间互电容和互电感，当某一相截流而产生过电压和重燃时，其暂态高频电流通过电磁耦合在其它两相同时感应出高频电流。参见图 5，若发生截流时，$i_a=0$，$i_b=-0.870I_m$，$i_c=0.870I_m$，A 相断路器发生截流后，由于恢复电压的上升，而使 A 相断路器触头间发生重燃。A 相等效电路同图 3，

$$\omega_o=1/\sqrt{(C+Cs)(L_{10}+L_{20})},\ i_{ga}=I_{gm}\sin\omega_o t$$

由于 ω_o 极高，则 L_s 相对应的感抗极大，可视为开路。观察电路图 5，B 相 C 相对 A 相而言参数对称，则根据 KCL 可知，$i_{gb}=i_{gc}=-1/2\cdot i_{ga}=1/2\cdot I_{gm}\sin\omega_o t$。此时若发生 $i_b+i_{gb}=0$，$i_c+i_{gc}=0$，即高频电流与原有工频电流叠加，其结果使另两相电流瞬间为零而被截断。对于工频来说，这种高频过程极快，可以认为是同时的。从而另两相的截流值可能很大，造成极高的过电压。另两相产生截流过电压分析同 1.1.1。

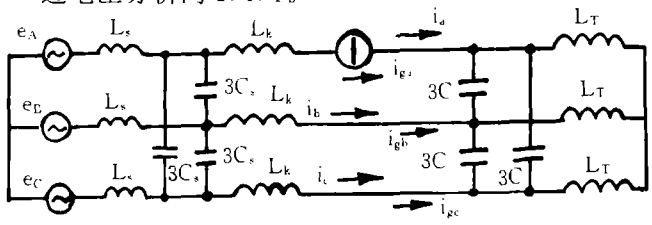

图 5　三相耦合感应示意

1.2　过电压的危害

一般情况下，异步电动机的预防性试验电压为额定电压的 2.5 倍，而由前面分析可知，无论是截流过电压还是三相同时开断过电压、高频重燃过电压，其统计过电压水平都高于异步电机的预防性试验电压。特别是真空断路器，作为高压电机的开断设备时更是如此，从而不可避免地对电机绕组的绝缘产生危害，如绕组绝缘产生闪烁或击穿。而且由于其频率较高，当它进入高压电机的绕组时，电压沿绕组分布不均匀，很容易引起绕组匝间绝缘的破坏。因此，需要引起高度重视。

2　高压电机操作过电压的保护措施

为限制开断高压电动机的操作过电压，实际工作中可采用多种途径加以抑制。

2.1　采用阀式避雷器

由于切断电动机所产生的过电压虽然幅值较高，但能量不大，故可用阀式避雷器或氧化锌避雷器限制过电压。选择避雷器时，避雷器所允许通过的能量应比电动机绕组的储能大、并将避雷器装置在断路器的电动机侧。性能良好的氧化锌避雷器可将过电压限制在 2.5 倍 Ue 以下，即不超过电动机的预防性试验过电压。

2.2　断路器触头并联电阻

在断路器内装置高阻值并联电阻 R 和相应的辅助触头。分闸时，投入电阻 R，可使绕组的电流不出现突然降到零值，从而限制了过电压。一般要求 R 值与电机励磁阻抗同一数量等级，即可限制操作过电压。具体计算参见有关文献。

2.3　阻容吸收

氧化锌避雷器虽然能限制过电压幅值，但对

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

降低电压的上升幅度却无能为力。而过高的过电压上升陡度，可能在电机绕组中造成电压的不均匀分布，从而引起绕组端部的匝间绝缘击穿。所以在有些情况下，仅仅采用氧化锌避雷器并不能防止过电压的破坏作用，此时，可改用阻容吸收装置，如图 6 所示。

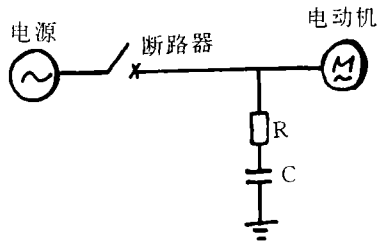

图 6 吸收电路

在真空断路器负载侧接入电容的作用是增加与负载并联的电容。这样，一方面可减小负载特征阻抗$\sqrt{L_t/C_t}$，以减小过电压的幅值。另一方面，可减小过电压的角频率 ω，从而降低过电压的上升幅度。接入电阻 R 的目的在于吸收负载回路中的能量，降低高频振荡电流的幅值，使流过真空断路器的电流不致由于高频电流的叠加而造成弧隙中电流突降过零点，这样可有效地防止电弧多次重燃而引起的过电压。

当负载为电动机时，从限制多次重燃过电压出发，R 和 C 的数值选择方法如下：

$$C=(1\sim2)C_0$$

$$R=1/\sqrt{3}\cdot(1+C_0/C)\cdot\sqrt{L_0/C_0}$$

式中 C_0 为负载的固有电容，L_0 为从电源到负载的线路电感。实际操作过程中，R、C 取值范围为 $C=0.1\sim0.5\mu F$，$R=100\sim200\Omega$。

3 实际应用

文章前面所提的事例，开关为真空断路器。自 1990 年投产以来，电动机损坏率极高。1995 年 5 月我们在高压电动机端口并联阻容吸收装置，电容 0.29μF/10.5kV，电阻 100Ω/2000W，Y 型联接。自改接投产以来，已运行两年多，效果明显、再也没有出现电动机绕组被击穿的故障，运行情况一直良好。

参 考 文 献

1 贺威俊等. 电气化铁道供变电工程. 北京：铁道出版社，1982

2 尚振球等. 高压电器. 西安：西安交大出版社，1992

Operating Overvoltage and Protection of High Voltage Motor

Chen Rong[1] *Qiu Daren*[2]

(1)Department of Electric Engineering of Yancheng Institute of Technology, Yancheng, 224003, PRC

2)Yancheng Factory of Chemical Fiber, Yancheng, 224003, PRC)

Abstract In this paper, the operating overvoltage produced in the course of practical use and its endanger are analyzed. The restraining methods of operating overvoltage of high voltage motor are putforward.

Keywords Motor; Overvoltage; Protection

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net