

# 电厂厂用电快切装置投切条件分析

洪佩孙

(河海大学 电气工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 电厂厂用电系统绝大多数负荷为异步电动机,在电源切换过程中异步电动机和同步电动机特性差别很大,但目前切换条件主要按同步电动机并联条件考虑,这就使得转子绕组中感应出的励磁电流自适应特性得不到利用,使切换条件趋于严格。通过分析切换过程中产生的电气和机械冲击的特性,提出一些新的概念,给出一个较为宽松的切换条件:以切入后异步电动机滑差作为主要的切换限定条件,可配置略带时延(0.1 s)的电流保护,在此情况下,可不必将相角差作为切换条件。

**关键词:** 异步电动机; 自动切换; 厂用电备用电源

**中图分类号:** TM 621.7<sup>+1</sup>

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2007)05-0036-04

在火力发电厂中,都有备用电源以保证厂用电供电可靠,大部分 200 MW 及以上机组和 100~200 MW 机组还设置备用电源快速切换装置(简称快切装置)。当工作电源消失时,快速切换到备用电源,使在事故情况下,除尽量减小厂用电失电时间外,还应对厂用电供电系统和厂用电设备的影响最小。为此应对快切装置设定动作条件。

## 1 快切装置现状<sup>[1]</sup>

目前,通用的快切动作条件是判断厂用母线失压后母线残压与备用电源之间的频率差、相角差或电压差(相量差),据华电集团内部调查统计,用得较多的快切整定值是频率差 1 Hz、相角差 30° 或电压差 40~50 V,同期捕捉频率差 5 Hz,残压 30 V。

现场实践表明,上述整定值能确保备用电源切换成功,并保证电动机的安全。但也发现过切换虽然成功,但切换电压太低,由带低压脱扣的接触器控制的辅机已经跳闸,即快切没有成功,是满足残压定值后合上的,而且在 200 MW 以下的机组快切的成功率较低。究其原因是快切判据过严,错过了快切的最好时机。

判据过严的原因主要是因为这些判据是参照同步电动机并列条件提出的,而厂用电主要负荷是异步电动机。同步电动机的励磁电流是由外加电压提供的直流电流,它所产生的磁通(旋转磁场)空间位置与转子有固定关系,而异步电动机的励磁电流为异步电动机定子外加电压时,由定子电流在转子绕组中感生的励磁电流是低频交流电流,如电机符合“理想电机”的条件<sup>[2]</sup>,它所产生的磁场对转子而言不是一个固定磁场而是一个旋转磁场,其大小、相位以及对转子的相对转速,对异步电动机运行状态而言有自适应性,这一自适应性在快切中应充分利用。从上述考虑出发,研究快切装置合理的投切条件。

## 2 厂用电投切过程中异步电动机特性分析<sup>[3]</sup>

同步电动机与异步电动机在稳态运行状态变化时工作特性有很大区别,在此,本节只分析异步电动机情况。

### 2.1 异步电动机在稳定运行状态下的基本特点

异步电动机在稳态运行时,定子回路电压方程为

$$U_M = E_M + I_M Z_M \quad (1)$$

式中, $U_M$  为定子外加电压相量;在忽略定子电阻时, $Z_M$  由电枢反应电抗  $X_{ar}$  及定子绕组漏抗  $X_{\sigma\sigma}$  构成; $E_M$  为异步电动机电势相量。

$E_M$  电势相量由转子电流  $i_r$  所形成的旋转磁链切割定子绕组产生, $E_M$  与  $U_M$  同频率。这些都与同步电动机相同。不同的是  $i_r$  不是直流而是交流,它是由定子电流所感生。当异步电动机为理想电机结构,即定子、转子绕组三相对称,相应的磁通沿气隙为正弦分布时, $i_r$  亦为相量电流  $I_r$ ,其频率小于  $f_N$ ,即滑差频率,与电动机工作负载有关。在转子绕组中的  $i_r$  为三相对称电流,即是异步电动机的励磁电流,它所形成的旋转磁场对转子以  $\omega_s$  角速度正向旋转,对定子则以角速度  $\omega_s + \omega_m = \omega_N$  旋转,故感生的电势  $E_M$  为同步频率。

另外,需着重说明的一点是,异步电动机电磁功率(即机械功率)输出虽然仍可由功率角  $\text{Arg} E_M / U_M$  决定,但  $E_M$  与异步电动机转子位置无直接关系,异步电动机电磁(机械)功率输出只与其滑差  $s$  有关,它由异步电动机  $M=f(s)$  力矩曲线确定。

### 2.2 异步电动机失压后运行状态的基本特点

异步电动机工作电源消失后就进入失压状态,若不计及并联异步电动机的互馈作用,其定子电流为零,转子绕组中失去由定子电流感应出的交流励磁电流,但由于转子绕组匝间有磁场,故当定子失压后,转子三相绕组产生瞬时电流,保持转子三相绕组中电流不突变,此电流构成定子失压后异步电动机的励磁电流,它按转子回路时间常数衰减。异步电

动机失压后的残余电压(电势),就是由这一衰减直流产生的。

异步电动机定子失压后虽仍有残压电势,但无外加电压,不产生转矩,在电动机负载制停下,异步电动机转速以较快速度下降,又进一步使残压减小。

需特别指出的是,因转子中励磁电流为衰减的直流,故异步电动机励磁磁通以 $(1-s)\omega_N$ 的角速度切割定子绕组,失压前、后异步电动机电势的频率将由 $f_N$ 突然变为 $(1-s)f_N$ 。由于异步电动机不断减速,故相应上述 $s$ 将由启动时滑差 $s_0$ 逐步加大,残压频率不断下降。

2.3 厂用电切换过程中异步电动机工作状态

异步电动机切换成功后将重新进入稳定运行状态,在此情况下,其转子励磁电流又恢复为低频交流在定子中感生同步电势,由于可认为厂用机械负荷未变,异步电动机仍工作于失压前原始滑差 $s_0$ 下。

下面分析切换过程中的变化情况。由于本文的目的是提出实用的投切条件,不拟从数学建模入手而只从物理概念上分析。

2.3.1 切换过程中转子绕组中电流变化

图 1 表明快切装置动作全过程中异步电动机(等效异步电动机)转子中电流的变化,图中 $i_a, i_b, i_c$ 为转子回路三相绕组中电流, $I$ 为 $i_a, i_b, i_c$ 在空间组成的电流相量, $\Delta i_c$ 为 c 相绕组中电流的非周期分量;电动机切入后只画 c 相电流变化情况,a、b 相电流类似;快切过程中滑差 $s$ 不变。在 $0 \sim t_1$ 之间,电流是频率为 $s_0 f_N$ 的交流电流,在 $t_1 \sim t_2$ 之间为衰减直流,在 $t_2$ 瞬间异步电动机切换在备用电源上,立即产生交流励磁电流,其频率为 $s'_0 f$ ,起始角与合闸瞬间备用电源电压相角有关,因异步电动机失压转速会下降,故 $s'_0 > s_0$ 。因合闸瞬间定子有冲击电流,故交流励磁电流起始幅值较大。切入后的交流励磁电压频率随着异步电动机进入稳定状态,如机械负荷没有变化,则逐步由 $s'_0$ 转变为 $s_0$ 。

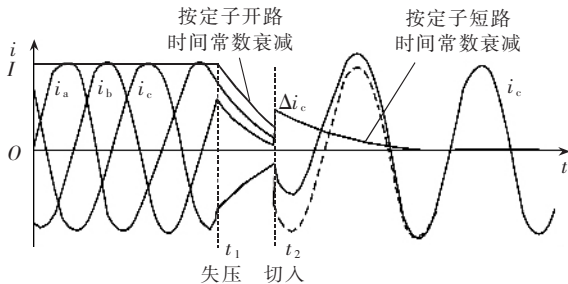


图 1 异步电动机失压和切入前、后转子回路电流原理图  
Fig.1 Rotor winding current of asynchronous motor during voltage loss and bus transfer

由于切换过程转子绕组中励磁电流的变化(大小、相位和频率)有自适应的性质,这就改善了切换过程中的各种冲击。

2.3.2 切换过程中的力矩冲击

异步电动机切入定子电压后定子出现电流。定子电流与异步电动机电势 $E_M$ 起作用即产生以电磁力矩 $M_e$ 表示的电磁功率 $P_e$ 。如在备用电源切入时异步电动机所带的机械负载力矩为 $M'_m$ ,则异步电动机就出现力矩冲击 $\Delta M$ 和功率冲击 $\Delta P$ 。

$$\Delta M = M_e - M'_m \quad (2)$$

与同步电动机不同的是,同步电动机并列时 $M_e$ 由功角 $\delta$ 决定,而异步电动机 $M_e$ 与转子机械位置无直接关系,仅取决于滑差 $s$ 。

图 2 曲线 1 为异步电动机电磁力矩 $M_e$ 与滑差 $s$ 的关系曲线,曲线 2 为电机机械负载力矩 $M_m$ 与转速即 $s$ 的关系曲线, $M_m = f(s)$ 。在正常稳定运行情况下,2 根曲线交于 0 点,0 点为稳定运行点。对应 0 点的滑差 $s_N$ 约在 2%~5% 之间。失压后, $M_e = 0$ 。机械负载因转速下降,沿 $M_e = f(s)$ 曲线向 $s$ 增大方向移动至 $0'$ 点。如在 $0'$ 点异步电动机切入电压,建立了 $M_m$ ,其工作点应为 $0''$ ,于是出现正 $\Delta M$ ,使异步电动机加速 $s$ 减小。如切换过程中,负荷结构不变,则最终工作点回到 0 点。从图 2 可见, $M_e = f(s)$ 曲线一般在 $s_{max} \sim 0$ 之间才是稳定的。在正常情况下,异步电动机工作点在这一线段的中偏下部分,所以从力矩冲击而言最大力矩冲击一般在 2 p.u. 以上。单纯从力矩冲击看,似乎切换时对 $s$ 无要求,实际上,若 $s$ 过大,则冲击过程持续过长,特别是当合闸时 $s$ 过大,合闸冲击电流就会过大。

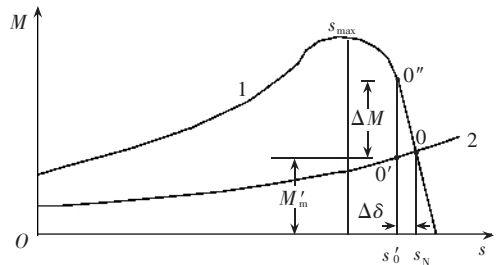


图 2 异步电动机 $M_m = f(s)$ 特性

Fig.2 Characteristic  $M_m = f(s)$  of asynchronous motor

2.3.3 切换过程中定子电流变化

在定子电压切入后,定子电流由 2 部分构成:工频分量 $I_s$ 与切入过程暂态分量。工频分量易由异步电动机等值电流求出,可参看有关文献。当忽略异步电动机励磁电流时,工频分量电流可用下式表示:

$$I_s = \frac{U_N}{(r_1 + r_2/s) + j(x_1 + x_2)} \quad (3)$$

式中 $U_N$ 为切入的系统电压; $x_1, x_2, r_1, r_2$ 为定子和转子绕组漏抗及电阻; $s$ 为滑差。

若切入时 $s$ 不是很大,例如 10% 以内,则 $I_s$ 不是很大。暂态分量电流由切入瞬间系统电压相位而定,它由 2 个因素确定。

a. 合闸瞬间由式(3)所确定的 $I_s$ 相角而确定的电流。这一电流与电力系统突然短路时非周期分量电流起始值类似。随 $I_s$ 起始角而定,它与切入瞬间 $U_s$ 瞬时值相等,方向相反。

b. 在切入瞬间,励磁磁通要拉入与外加电压对应,在此情况下转子回路电流要发生冲击,这一电流也要定子电流变化支持,于是又出现定子电流冲击。

上述 2 项电流构成异步电动机切入时定子的暂态电流。从上面的分析可见,异步电动机切入时定子冲击电流大小与以下条件有关:

a. 切入时滑差大小,它不仅影响式(3)中 $I_s$ 大



小,而且影响其持续时间;

b. 切入瞬间  $E_M$  与  $U_M$  的角度差;

c. 切入前转子残余磁通的大小,它可由残压大小反映。

但是需注意,后 2 项影响所持续的时间由定子经外接阻抗短路时转子回路时间常数确定,在切入过程中,转子回路时间常数较小,所影响的定子电流消失较快。

## 2.4 厂用电快切装置投切条件分析

前面分析了异步电动机在电源切换过程中的一些特性,主要分析了它与同步电动机之间的不同点,以便给出快速切换条件。

### 2.4.1 频率差与滑差

同步电动机并列时,对发电机和系统之间电压的频率差有严格的要求,而异步电动机切入时频率差却有不同概念。由于异步电动机电势频率和转子机械转动无刚性关系,所以异步电动机电势频率和相角在切换前后可以快速变化,因为其转子绕组中励磁电流的变化,不涉及到机械转动惯量问题。

在外加电压下异步电动机电磁(机械)功率输出由滑差确定。异步电动机滑差是其机械转速与电势同步转速之间差别的相对值,滑差不能突变。异步电动机失压后以残压方式运行时残压频率即为其转速角速度,切入后不能突变,因此异步电动机在切入前残压与电源频率差决定了切入后瞬间异步电动机运行的滑差。而异步电动机工作滑差决定其电磁力矩,所以对异步电动机切换而言滑差是首要考虑因素。

图 2 表明异步电动机在切入过程中滑差随力矩变化的情况,异步电动机切入后力矩冲击不应过大,并且希望尽快地拉入稳定点。

异步电动机失压后,滑差  $s$  只反映其转速。设异步电动机在  $O'$  点切入,对应此点滑差为  $s'_0$ ,则切入后达到稳定运行状态时,滑差变化为

$$\Delta s = s'_0 - s_0 = s'_0 - s_N \quad (4)$$

注意,  $s_N$  对应的不是同步速的情况。

为了缩短异步电动机切入后进入稳定状态的时间,  $\Delta s$  应合理的小,式(4)应作为快切装置动作的首要判据。因异步电动机残压频率代表  $s'_0$ ,即  $f_M = (1 - s'_0) f_N$ ,故滑差判据可用下式表示:

$$s_{set} = \Delta s + s_0 \quad (5)$$

如以频率表示,则

$$f_{set} = [1 - (\Delta s + s_0)] f_N \quad (6)$$

式中  $f_{set}$  为残压频率整定值;  $f_N$  为额定频率,即电源频率。

当异步电动机失压后残压频率  $f_m \geq f_{set}$  容许切入,而  $f_m \leq f_{set}$  闭锁切入。问题是,  $\Delta s$  如何确定。

从图 2 中可以看出切入时异步电动机滑差应小于  $s_{max}$ ,否则切入后过渡时间太长,而在这一范围内  $M_e = f(s)$  接近为直线。计算出  $s_{max}$  一般约为 20%。如  $\Delta s$  取 5%,  $s_0$  取 3%,则  $f_{set}$  约为 4 Hz。在此情况下,不致造成太大的力矩冲击。

现提出的按滑差确定快切装置允许切入判据比按同步电动机并列条件要宽得多,同时要指出切入后异步电动机工作滑差不是零而是  $s_0$ 。

### 2.4.2 残压大小及切入时残压的相位

同步电动机并列时其电压和相位是很重要的条

件,因为同步电动机励磁电流是由直流电源提供的,而电压的相位代表转子角,切入后就确定了功率角  $\delta$ ,而异步电动机中情况就很不相同,它们只影响切入后转子电流过渡过程,当然转子电流过渡过程也会造成定子电流和机械力矩的冲击,但消失很快。

在实际过程中,结合异步电动机特点,切入时残压最低值和残压与电源电压角差为多少,是一个要研究的问题,还要通过一些试验并考虑实际运行经验来确定,这里只从概念上作一些分析。

切入后转子回路发生的电磁暂态过程与切入前残压大小和切入瞬间外加定子电压相位有关。暂态过程开始时转子电流为残余直流(它形成支持残压的旋转磁通相量),然后过渡到三相低频交流电流(它在气隙中形成同步旋转磁通)。参看图 1,可以看出,切入时转子电流和定子电流冲击是与残压大小和切入前瞬间 2 个电压相量角度差有关,不能单独考虑。但总体而言,切入时异步电动机残压和备用电源电压的相位差(注意它不是与转子角位置有关的功角)不是一个太重要的因素。

## 3 结论

a. 以异步电动机为主要负载的发电厂厂用电在工作电源消失后备用电源快速切换过程中考虑的条件与同步电动机并列有很大的不同,虽然异步电动机切入时仍可以残压和备用电源之间的频率差、电压差和相角差作为条件,但在概念上有所不同,整定依据也有所不同。

b. 仍可用残压与备用电源频率差作为主要判据,但目的是保证异步电动机投入后有合理的滑差,使突然切入后较快地达到力矩平衡,恢复厂用电动机正常负载运行,并缩短电磁冲击持续时间。频率差的整定值可以较大,根据异步电动机力矩、滑差特性,此值可达 5~8 Hz。

c. 目前,快切装置切入条件中,电压差和相角差都作为单独切入条件,从本文分析可知,在切入过程中这 2 个条件都是影响有异步电动机转子回路中电流衰减直流变为滑差频率交流励磁电流的过程,这一过程是电磁过程,其变化的速度由定子短路时转子回路时间常数确定,是一个短暂的过程,在此过程中主要只引起异步电动机电流冲击,不会造成大的力矩冲击。因此电压差和相角差可以作为综合考虑的切入条件。从上面的分析可以看出相角差为零时并不见得是最佳的切入条件。

d. 按异步电动机负载的实际情况,厂用电快切装置切入条件可放宽和简化,基本点如下:切入条件以频率差检测为主,用其检测异步电动机失压后转速的变化,并按切入后异步电动机力矩变化过程确定其整定值;电压差、相角差检测作为辅助条件,可以放宽,如通过实践论证,相角差可不作为切入条件;为了防止切入时暂态电流过大影响设备安全和厂用电系统运行,可配置略带时延(0.1 s)的电流保护。

e. 厂用电快切成功的基本条件是失压后切入前异步电动机的转速,由于失压后电动机转速不断下降,所以快速切入是关键。因此,只要频率差检测确定电动机转速在一定范围内应尽快切入。

## 参考文献:

- [1] 艾德胜. 以电流为判据的厂用电源快切原理及实现[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(6): 85-88.  
AI De - sheng. House supply fast transfer criterion based on impulse current and its realization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(6): 85-88.
- [2] 洪佩孙. 关于异步机失压后的残压频率[J]. 江苏电机工程, 2000, 19(1): 47-48.

- HONG Pei-sun. On residual voltage frequency after asynchronous motor out - of - voltage[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2000, 19(1): 47-48.
- [3] 章名涛. 电机学[M]. 北京: 科学出版社, 1993.  
(责任编辑: 柏英武)

## 作者简介:

洪佩孙(1932-), 男, 江苏南京人, 教授, 主要研究方向为电力系统稳定、电力系统继电保护。

## Operating conditions of fast transfer equipment of plant power supply system

HONG Pei-sun

(Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The difference between asynchronous and synchronous motors in characteristics during bus transfer is quite large and most loads of plant power supply system now are asynchronous motors, however, the operating conditions are still considered mainly as that of parallel synchronous motors, which makes the adaptive characteristic of excitation current induced in rotor winding not utilized and the transfer conditions stricter. The electrical and mechanical impact characteristics during transfer are analyzed, and some new concepts are presented to mitigate the transfer conditions: taking the slip difference of asynchronous motor after transfer as the main transfer limit and configuring the current protection with time delay of 0.1 s, in this case, the phase difference condition is not necessary.

**Key words:** asynchronous motor; automatic transfer; plant standby power supply

.....