

火电厂厂用电自启动过程中继电 保护与自动装置工况分析

山西省电力局中调所 李养善

摘要: 本文根据实际试验总结了火电厂厂用电成组自启动过程的特征,对有关继电保护和自动装置的整定与配合进行了分析,对厂用电动机低电压保护的工作方式提出新的建议,旨在从根本上纠正目前厂用电系统存在的问题,使安全运行建立在科学、可靠的基础之上。

按如下原则考虑:

- (1) 尽可能使环网处于开环运行;
 - (2) 在整定开关对侧母线上轮停 1~3 个元件,进行计算分析;
 - (3) 不同电压等级之间保护配合整定时考虑变压器分支侧的助增作用;
- 上述计算均采用在基本方式下的阻抗矩阵上追加处理;

(三) 特殊情况的处理:

- (1) 当距离 II 段的灵敏度在各种方式条件下均不能满足要求时,该程序可采用人机对话方式,对灵敏度要求作适当降低处理,再进行计算以满足配合要求;
- (2) 在环网计算中,当长线与短线出现无法配合的情况时,程序设计了以人机对话方式进行的提示,并且采取追加一级时位的措施,以满足选择性要求,并在方案本上予以明显说明;

四 结 束 语

该软件能在 VAX 系列、DUAL-6800、IBM 系列机上运行,并经调试、试验证明结果正确使用方便,目前已在湖北电网投入使用,效果良好。

该文曾经何志远高级工程师审阅,在此表示感谢。

参考文献

- [1] 华北电业管理局调度处.《电力系统继电保护与安全自动装置整定计算》.
- [2] 电力工业部生产司.《110kV—220kV 电网继电保护与安全自动装置运行条例》(试行).
- [3] 西安交通大学等合编.《电力系统计算》.
- [4] 湖北省电力中心调度所.《电力系统故障程序》.

一 概 述

当发电厂厂用工作电源系统发生事故, 继电保护装置有选择地只切除(或联跳)厂用工作电源开关时, 自动装置——备用电源自动投入接线应在厂用工作电源开关断开后迅速投入备用电源。但是, 备用电源投入时的机炉厂用辅机的工作状态, 由于故障过程(与保护动作时间有关)中厂用母线电压的降低和电源切换过程中中断电源而趋于恶化, 其严重程度不仅直接影响着备用电源投入后的成组自起动过程历时长短和效果, 而且不同程度地影响热力系统参数(例如给水系统母管压力等)的变化和自动调节。在某严重的自起动(例如备用厂变已代替某台工作变运行过程中另一台工作变跳闸时)场合, 往往引起给水母管压力降低到电动给水泵水压联动定值(例如 $120\text{kg}/\text{cm}^2$)时, 处于联动备用状态的电动给水泵由静止状态投入处于成组自起动的厂用母线, 使自起动过程变得冗长而复杂。如果厂用系统的继电保护装置整定不当, 则可能导致继电保护误切正在升速中的机炉辅机, 使成功在望的成组自起动终遭失败。

二 备用电源自投引起的自起动过程分析

1. 自起动过程中电压恢复的阶段性的

单机试验表明, 不同厂用辅机的起动和隋走特性是各不相同的。因此, 在比较严重的成组自起动过程中表现为电压恢复的阶段性的。

(1) 比较各种厂用辅机的阻力矩和电动转矩特性可以知道, 只要自起动起始电压不低于 $55\%U_e$ (额定电压), 循环泵、送风机和引风机等电动机即可得到约 $10\%M_e$ (额定转矩)的加速转矩, 转速逐渐上升。当电压恢复至 $75\sim 80\%U_e$ 左右时, 它们已接近正常转速, 此为第一阶段, 历时 3.5 秒左右。在本阶段, 电动给水泵基本上处于徘徊状态。

(2) 自起动过程中, 当电压达到 $80\%U_e$ 左右时, 电动给水泵(YK-2000)才获得明显的加速转矩而结束徘徊状态, 经过若干秒(较困难的自起动方式下约需 $7\sim 8$ 秒)滑差减小至临界滑差以下, 电压基本恢复正常厂用母线运行电压, 此为第二阶段。

(3) 自起动过程中, 由于给水母管压力降低使电动给水泵投入自起动母线时, 第二(或一)阶段电压恢复曲线会出现突变“阶梯”, 并使该阶段时间显著延长。

(4) 当备用厂变已接带某段(甚至两段)厂用负荷而又被联动投入接带新的自起动负荷时, 一、二阶段的持续时间都相对增加, 严重的自起动过程往往长达 $16\sim 17$ 秒。国外资料数据中有的自起动过程延续 $30\sim 35$ 秒才完成。

(5) 失压时间对成组自起动的影响

综合分析电动机的阻抗滑差特性和电流滑差特性(即 $Z=f(s)$ 和 $I=f'(s)$)可以看出, 当滑差(s)到达某一范围时, 电动机的阻抗(Z)和静子电流(I)都要发生急剧变化。当电动机失压时间(应按保护动作时间与厂用母线电源切换时间之和考虑)使电动机滑差到达和超越这一范围时, 自起动将发生质的变化, 导致自起动困难。以电动给水泵电动机(YK-2000)为例, 其质变滑差范围约为 $(0.07\sim 0.1)$, 与之相对应

的失压时间约为(0.7~0.8秒)。只有当失压时间短于电动给水泵要求的临界失压时间(对YK-2000来说,可取0.8秒)时,自启动起始电压才比较高,成组自启动的阶段

不十分明显。

2. 电动给水泵的自启动特性分析

图1示出电压下降时ATM—2000电动机的转矩变化曲线组和电动给水泵的阻力矩特性的相对关系。当自启动负荷比较重(例如同时接带两段厂用母线),同时失压时间较长(例如由后备保护切除故障)时,电动给水泵转速下降程度较为严重(滑差 s 达0.5~0.7左右),备用电源投入时,由于电动给水泵阻抗急剧减少而自启动电压较低,电动机提供的转矩小于相对应的阻力矩,事实上电动给水泵在自启动开始阶段(0~3.5秒)基本上没有得到加速,处于等待状态,称之为“徘徊”阶段。

当自启动过程中电压恢复到75% U_0 以上时,电动给水泵的转动方大于阻力矩。因为电压回升速度较慢,

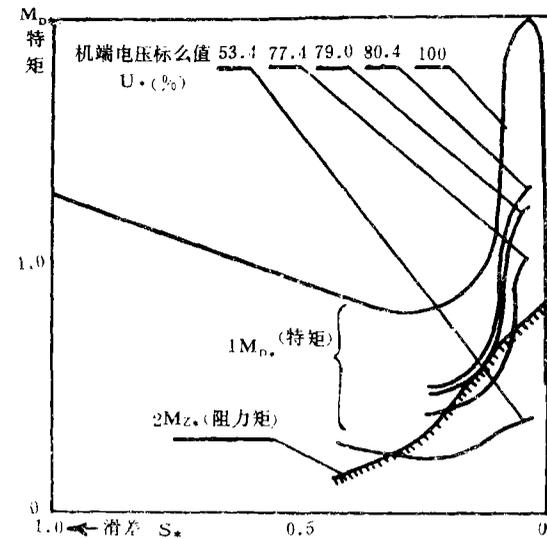


图1 给水泵电动机机端电压变化时

1. 电动机转矩 M_{D*} 与滑差 s 的关系

$$M_{D*} = f(s)$$

2. 给水泵阻力矩 M_{Z*} 与滑差 s 的关系

$$M_{Z*} = f'(s)$$

且抛除电动机转子损耗和机械损耗后,电动给水泵得到的加速转矩开始还不够大,只是在自启动即将完成,厂用母线电压回升到85% U_0 以上时,才获到较大的加速转矩。而结束自启动过程。正因为这样,对于较严重的自启动过程历时往往大于10秒才能完成。如果自启动过程中伴随电动给水泵联动投入自启动母线时,则自启动过程历时更长。

3. 备用电源自动投入和电动给水泵低水压联动的从属关系

现代化的火力发电厂,均装设厂用系统备用电源自动投入和电动给水泵低水压联动自投装置。正常情况下,二者似乎互不相关。但自启动过程发生时,往往伴随出现给水母管水压降低。于是,二者有机地联系在一起了。如果自启动母线段连接着处于联动状态的电动给水泵时,二者的关系则更为紧密。假如,电动给水泵联动发生在自启动过程的第一阶段,则使引风机、送风机和循环水泵等升速过程减慢;如果发生在自启动过程的第二阶段,则使正在升速的其他电动给水泵可能重返“徘徊”状态。因为它的联动投入不仅增加自启动容量,而且是从零转升速($s=1$),必然使正在恢复中的自启动母线电压再次下降。实验证明,由于它的联动投入,引起10秒低电压保护动作,将重要机炉辅机切除,直接导致自启动失败。因此,对电动给水泵的联动投入“时机”应加以控制。

从剩余加速转矩分析可以看出,只有当自启动母线段电压恢复到85% U_0 以上时,联动投入电动给水泵才能迅速发挥效益。从给水压力的恢复角度分析,电动给水泵过早地

联动投入，不仅本身不能迅速供水，而且影响其他正在升速中的电动给水泵的供水流量。因此认为，电动给水泵的联动合闸回路，应经返回电压为85%U₀的电压元件（或其重动元件）的触点闭锁。这样，只有当自启动母线电压恢复到85%U₀以上时，才允许处于低水压联动状态的电动给水泵投入。试验证明，采取这一措施后，确实缩短了自启动过程，炉、机的运行状态没有因此而造成不良影响。

三 自启动过程中电动机的温升核算

对于具有通风装置的电动机来说，其定子线卷的发热时间常数可由下式求得：

$$T = \frac{150\tau_c}{k_R j_{de}^2} \quad (1)$$

式中 k_R ——计及交流电流而使电阻增加的系数取1.05；

j_{de} ——定子线卷额定电流密度（安/毫米²）；

τ_c ——定子线卷的额定温升（℃）。

当满载运行状态下的电动机失去工作电源而联动投入备用电源后转为自启动过程时，令其极限温升为 τ_M ：

$$\tau_M = \tau_c + \Delta\tau \quad (2)$$

式中 $\Delta\tau$ ——允许附加温升

于是附加温升系数 α 可由下式求出：

$$\alpha = \frac{\tau_c + \Delta\tau}{\tau_c} = \frac{\tau_M}{\tau_c} \quad (3)$$

当略去散热因素且只计及铜损时，自启动允许时间可由下式求得：

$$t = T \frac{\alpha - 1}{k^2 - 1} \quad (4)$$

式中 k ——自启动电流倍数。

在自启动过程中，引风机、送风机和循环水泵等辅机约在3秒钟之内即基本完成自启动过程；低水压联动投入的电动给水泵由于加入85%U₀的闭锁，其起动工况接近于正常起动工况。所以，仅需对正常处于运行状态的电动给水泵（例如ATM—2000、YK—2000、YK—3200）进行核算。

根据1965版《电机基本技术要求》（GB—755—65），采用B级绝缘的定子绕组温升 $\tau_c = 44.3^\circ\text{C}$ ， $\tau_M = 80^\circ\text{C}$ 时。

代入式（1），求得 $T = 550$

代入式（3），求得 $\alpha = 1.8$

代入式（4），并取 k 为不同数值时，求得允许过载时间 t 如表1，所示：

表 1

k	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.56
t (秒)	352.0	146.7	83.8	55.0	39.1	29.3	22.9	18.3	10.0

在某高温高压热电厂的一系列自启动试验表明，即使按后备保护动作断开工作电源

并联备用电源（全部失压时间2.37秒），同时接带两段厂用负荷（包含两台电动给水泵）自启动时，全过程约16~17秒，电动给水泵电机自启动电流最大约3.5倍额定电流值。查阅表1，从温升考虑，自启动允许时间为39.1秒，尚有很大裕度。考虑到自启动过程中电动机的过电流倍数（相对于额定电流）是逐渐减少的，最后趋近于1。因此，实际允许过载时间还要更长些。而过早（如9~10秒）地把重要的机炉辅助电动机跳闸是不妥当的。

四 厂用系统几种继电保护和自动装置的整定

1. 厂用电动机的10秒低电压保护

配置10秒低电压保护的目的在于：由于事故厂用母线电压降低而工作电源跳闸、备用电源自动投入引起的自启动过程中，在不损害电动机绝缘的前提下，尽量维持重要电动机运行以达到保持火电厂机炉安全运行，进而保证电力系统的安全与稳定。自启动过程中，厂用母线电压的回升信息应是自启动是否顺利的重要判据。这一判据应由其电压继电器担任，其定值应按大于重要辅机的最高临界启动电压 U_{L0} 。通常，电动给水泵的临界启动电压最高，约为 $0.72U_n$ 。因此10秒低电压保护的电压整定为：

返回电压： $0.75U_n$

该继电器10秒前返回，标志着除电动给水泵外，其他辅机均恢复正常；电动给水泵也进入升速过程，自启动是顺利的。

该继电器10秒（或9秒）不返回时，只是标明自启动不顺利。例如，未加入电动给水泵 $85\%U_n$ 闭锁或闭锁失灵时，自启动就可能不太顺利。这时，可发出《自启动警告》信号，其含义为：自启动母线段电压从低于（ $0.75U_n$ ） k_1 （返回系数）算起已历时9~10秒尚未恢复到 $0.75U_n$ ，它提醒有关运行值班人员密切注意厂用母线电压的变化趋势和重要电动机的运转情况，做好处理方案准备，例如转移电动给水泵负荷等。如果有条件的话，可由电子计算机跟踪采样进行处置。对于个别单位，还可暂时改为：10秒低电压保护发出（自启动警告）信号的同时，中继启动另一个时间继电器，再经15~2秒跳开重要电动机。

但是，目前有些电厂的10秒低电压元件按表2整定（参考资料6）

表 2

电压整定值（额定电压的百分数）	
高温高压电厂	45~50
中温中压电厂	40~45

其整定不仅低于重要电动机最高临界启动电压，甚至低于厂用母线要求的最低自启动电压值（参考资料6）；

这样整定的结果，必然是备用电源一经投入，电压继电器便立即返回，几乎失去工作的机会，如何发挥它的功能呢？实质上等于取消10秒低电压保护。

表 3

	类 型	自启动电压 (%)
高压厂用母线	高温高压电厂	65~70
高压厂用母线	中压电厂	60~65

此外，还有一些火电厂的10秒低电压保护仍采用如下整定值：

低电压元件动作值取 $35\%U_n$ ，9~10秒跳重要厂用辅机。

当电动给水泵联动回路未经低电压闭锁时，的确存在着本文前面指出的问题，即在遇有比较困难的自启动过程中，过早地切除正在升速的重要厂用辅机，导致火电厂管炉停机的危险性。

2. 厂用电机的0.5秒低电压保护

设置0.5秒低电压保护的目的在于：减少备用电源投入后的自启动负荷容量，缩短重要电动机的自启动过程。但在分析自启动过程的录波时发现，在某些场合（例如工作电源开关机械脱扣跳闸时），备用电源已经投入，但次要电动机还未跳闸，往往参加0.2~0.3秒的自启动，对保证重要电动机自启动不利，对备用变压器高（低）压侧过电流保护定值选择也有些影响。为此，宜增设工作电源跳闸联动加速0.5秒低电压保护回路，以防止次要电动机参加自启动。为使加入该回路后不致给运行操作工作带来麻烦，加速回路由工作电源开关的动断触点串接本厂用母线段的备用电源开关的动断触点。当备用电源开关投入后，加速联跳回路便自动断开。

低电压元件的动作值应避越正常运行时可能出现的最低工作电压，并在灵敏度上略高于10秒低电压元件。为了简化接线和减少元件，可以与电动给水泵联动闭锁电压定值一致，即按 $85\%U_n$ 为低电压继电器的返回电压整定。

3. 电动给水泵低电压联动闭锁电压的整定

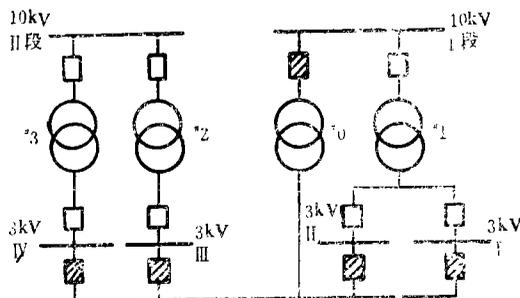


图 2 厂用系统主接线 (I)

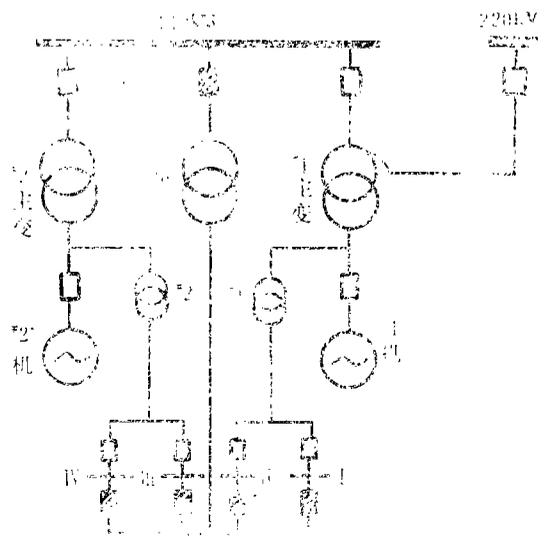


图 3 厂用系统主接线 (II)

前已述及，处于联动状态的电动给水泵投入“时机”应加以控制，不仅能使本身迅速发挥效益，而且不致影响其他电动给水泵的升速，通过加速转矩分析，认为85%U_n作为闭锁继电器的返回电压是合适的，并为实际试验证明是有效的。

五 结 论

1. 本文提出的整定原则和一些改进建议，已在某高温高压热电厂采用多年，证明是可行的。

2. 本文推荐厂用电机的10秒低电压保护应由跳开重要机炉辅助电动机改为发出“自起动警告”信号方式，并经温升核算是安全的。

3. 目前有些电厂由于低电压保护定值偏低，10秒低电压保护实际上相当于取消状态；另外一些电厂低电压保护定值偏高，亦未正确处理电动给水泵联动和备用电源自投之间的关系，存在着潜在危险。这些问题都应引起重视。

4. 火力发电厂的厂用主接线如图2或图3所示者，应通过试验校核可能出现的难度较大的自起动方式。试验时应退出10秒低电压保护（或改为发出信号）；同时应验算备用变压器高低压侧过电流保护定值，必要时适当放大定值或退出跳闸位置，以免自

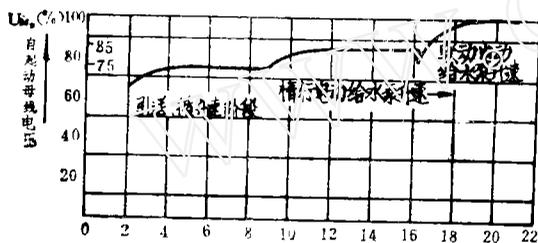


图 4

动过程中断开备用厂用变压器。大量的试验表明，自起动试验是安全的，自起动过程历时一般小于20秒。大于30秒时应采取措施，保证机炉安全运行。

两种典型的厂用系统主接线如图2和图3所示。（见附录）。

5. 按照本文建议对高温高压电厂低电压保护和电动给水泵低水压联动闭锁整后，较困难的自起动过程如图4所示。

附录：两种典型的厂用系统主接线图（图2和图3）

参 考 文 献

- 〔1〕厂用电自起动试验报告
- 〔2〕〔苏联〕И. А. 赛罗米亚特尼科夫著。邬显明译。感应电动机的运行方式。
- 〔3〕〔苏联〕Е. П. 基齐拉著。李学博、金惠国译。动力系统自动装置的计算。
- 〔4〕〔苏联〕А. Б. Барзам著。牟敦庾译。电力系统自动学。
- 〔5〕《火电设计赴日考察实习报告》摘要。
- 〔6〕火力发电厂厂用电设计规定（DLGJ17—81）。电力工业出版社。
- 〔7〕发电厂厂用电动机运行规程。水利电力出版社。
- 〔8〕电机基本技术要求（GB755—65）。