

动力系統自动裝置的計算

(苏联) E·II·基齐拉 著

李学博 金惠国 譯

中国工业出版社

动力系統自动裝置的計算

〔苏联〕E·П·基齐拉 著
李学博 金惠国 譯

中国工业出版社

本书阐述了动力系统自动化方面的主要自动装置的实用计算方法。其中包括有：直流电动机自动启动、备用变压器自动投入、发电厂自用电备用电源自动投入、三相自动重合闸、非同步自动重合闸、发电机自同步、动力系统按频率自动减载、同步发电机复式励磁等的计算。

书中各章给出了简要的基本原理、计算公式和接线图，并有详细的计算实例。

本书可供电力院系的大学生和电业部门的工程技术人员阅读。

Е.П.Гизила

РАСЧЕТ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ ЭНЕРГОСИСТЕМ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ УССР
КИЕВ—1962

* * *

动力系统自动装置的计算

李学博 金惠国 译

*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑（北京阜外月坛南书房）

中国工业出版社出版（北京修业里路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 787×1092 毫米·印张 $6\frac{7}{16}$ ·字数139,000

1964年4月北京第一版·1964年4月北京第一次印刷

印数0001—7,155·定价(科七)1.00元

*

统一书号：15165·2903(水电-394)

目 录

第一章	直流电动机按反电势函数自动启动的计算.....	1
第二章	根据自启动条件计算不切除电动机的功率.....	13
第三章	备用变压器自动投入的计算.....	20
第四章	经过电抗器供电的发电厂自用电备用电源 自动投入的计算.....	32
第五章	单端供电线路三相自动重合闸的计算.....	40
第六章	具有自整步水轮发电机的线路AIB的计算.....	49
第七章	动力系统非同步自动重合闸的计算.....	64
第八章	KA-11/13型半自动同步仪的整定计算.....	83
第九章	发电机自同步的计算.....	96
第十章	动力系统按频率自动减负载的计算.....	109
第十一章	同步发电机在正常运行方式下复式励磁 的计算.....	131
第十二章	借助稳定判据计算自动调节系统的稳定性.....	140
附录一	直流电磁继电器加速动作时间的计算.....	164
附录二	电火花熄灭装置的计算.....	179
附录三	逆序电压过滤器的计算.....	187
参考文献		199

第一章 直流电动机按反电势函数 自动启动的计算

概 論

在現代的发电厂中除了有同步电动机和短路轉子式的异步电动机以外，还应用直流电动机。在火力发电厂中所以要应用直流电动机，是因为它的轉速調节范围很寬，而且調节起来很輕易。对于象煤粉电厂的給粉机，泥煤电厂的鏈条炉篦等設備来說，这一特性十分重要。在水力发电厂中也要采用功率不超过100千瓦，并联或串联激磁的直流电动机。

发电厂中所有的电动机都有启动、停止、監察正常工作状态的装置，或者还有調整轉速的装置^①。

功率小于0.5千瓦的电动机，由于具有相当大的电樞电阻，以及能够容許相对于額定值来說比較大的峰值电流，因此可以不經過启动电阻而直接接入电网〔参1〕。功率大于0.5千瓦的电动机不应当采用直接启动，因为它将通过比較大的启动电流，燒坏換向器和碳刷，引起繞組中产生强大的电动力，并使电动机軸上的力矩过大。

并激直流电动机的自然机械特性和机械特性

自然机械特性，是电动机在額定电压和額定激磁电流下，电樞电路中沒有接入电阻时所得到的 $n=f$ 或 $(M)n=$

① 这些装置在电机、电力驅動和继电保护的專門課程中詳細研究。

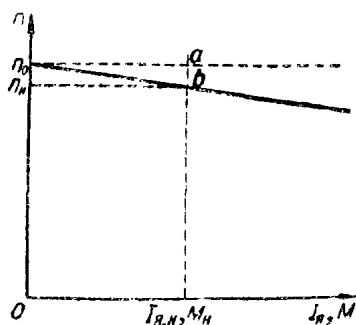


图1 并激直流电动机自然机械特性曲线

$f(I_a)$ 特性曲线。自然机械特性曲线可以通过两点来建立, 其中的一点对应于额定转矩 M_n (或额定电枢电流 $I_{a,n}$) 和额定转速 n_n , 而另一点对应于转矩 $M=0$ (或电流 $I_a=0$) 和理想空载运行的转速 n_0 (图1)。额定转矩 M_n (或额定电流 $I_{a,n}$) 和额定转速 n_n 可以从电动机的铭牌

数字决定, 而理想空载运行的转速 n_0 根据下一公式计算[参2]

$$n_0 = n_n \frac{U}{U - I_{a,n} R_a}, \quad (1)$$

式中 U ——电动机额定电压;

R_a ——电动机电枢电阻。

如果电枢电阻 R_a 是一个未知数, 则其值可以由计算近似决定。这时假定在额定负荷下电动机的全部损耗都是铜损, 也就是

$$I_{a,n}^2 R_a = 0.5 U I_{a,n} (1 - \eta_n),$$

因此

$$R_a = \frac{0.5 U (1 - \eta_n)}{I_{a,n}}。 \quad (2)$$

式(2)中的效率在额定负荷下是比值

$$\eta_n = \frac{P_{a.a.}}{P}, \quad (3)$$

式中 $P_{a.a.}$ ——电动机轴上给出的功率, 千瓦:

P ——电动机功率 $UI_{\text{я.н}}$, 千瓦。

实际的机械特性用标么值(或百分率)来表示, 这时自然机械特性将是

$$n_* = f(M_*) \quad (4)$$

或

$$n_* = f(I_{*\text{я}}), \quad (5)$$

式中 $n_* = \frac{n}{n_0}$ ——标么值转速;

$M_* = \frac{M}{M_{\text{я}}}$ ——标么值转矩;

$I_{*\text{я}} = \frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{я.н}}}$ ——标么值电枢电流。

式(5)是自然机械特性的一般表示形式, 也就是用电枢电流 $I_{\text{я}}$ 和转速 n 的数值来表示, 这表示式可以由额定电压 U 下的理想空载运行转速表示式(1)来推演。这时式(1)可以写为

$$n_0 = n \frac{U}{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}},$$

因此

$$\begin{aligned} n &= n_0 \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{U} = n_0 \left(1 - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{U} \right) \\ &= n_0 \left(1 - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{I_{\text{я.н}} R_{\text{я.н}}} \right) = n_0 (1 - I_{*\text{я}} R_{*\text{я}}) \end{aligned}$$

或

$$\frac{n}{n_0} = 1 - I_{*\text{я}} R_{*\text{я}},$$

即

$$n_* = 1 - I_{*\text{я}} R_{*\text{я}} \quad (5a)$$

式(1)用各额定参数(转速、电压和电流)表示时具有以

下形式

$$n_n = n_0 \frac{U - I_{n,n} R_n}{U} = n_0 \left(1 - \frac{I_{n,n} R_n}{U} \right)。$$

等式的左右各項都除以 n_0 ，得到

$$n_{*n} = 1 - \frac{I_{n,n} R_n}{U}$$

或

$$n_{*n} = 1 - \frac{R_n}{\frac{U}{I_{n,n}}} = 1 - \frac{R_n}{R_{n,n}} = n_{*0} - R_{*n},$$

因此

$$n_{*0} - n_{*n} = R_{*n}, \quad (6)$$

式中 $n_{*n} = \frac{n_n}{n_0}$ —— 标么值額定轉速；

$R_{n,n} = \frac{U}{I_{n,n}}$ —— 电动机額定电阻，欧姆；

$R_{*n} = \frac{R_n}{R_{n,n}}$ —— 标么值电樞电阻。

从等式(6)可以看到，轉速差的标么值（从空載运行过渡到額定負荷）等于标么值电樞电阻 R_{*n} 的数值。

由此得到結論，电动机的标么值自然机械特性(6)当参数为額定时可以通过两点来建立，它們的坐标是

$$n_{*0} = 1; I_{*n} = 0$$

和

$$n_{*n} = n_{*0} - R_{*n} = 1 - R_{*n}; I_{*n} = 1。$$

这种特性在图2中表示为直綫 PH 。从特性曲綫可以看到，电动机电樞的内电阻越大，轉速降低也就越大（由于电樞电路的电压降），自然机械特性曲綫斜率也越大，曲綫的

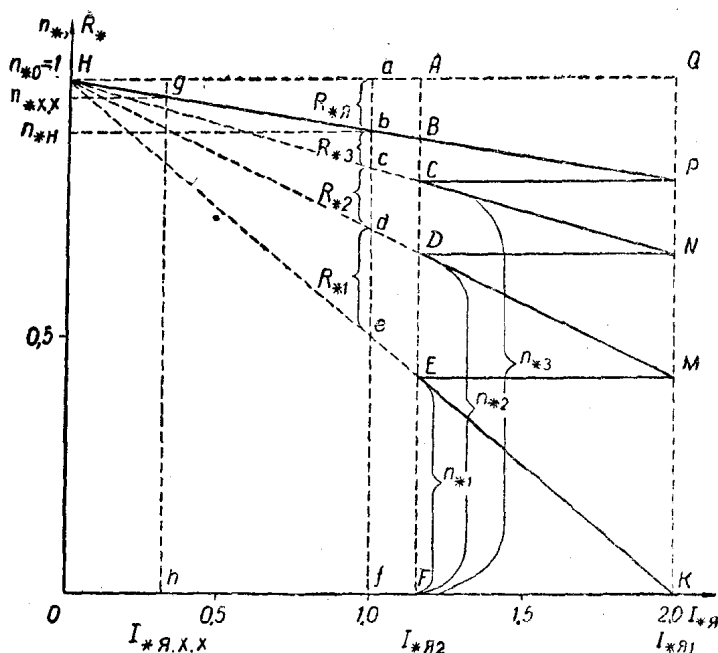


图2 并激直流电动机的标么值机械特性(启动图)

硬度越小。

当电枢电路中具有任意值的外电阻时作出电动机的机械特性，这些特性都是直线并且通过共同点 H (图2)， H 点的坐标是 $n_{*0}=1$ 和 $I_{*R}=0$ 。

电动机的机械特性曲线可以用下面的方法来建立。首先取定启动电阻的级数（如果没有给定）。这是在电动机转子的容许启动电流波动从 I_{*R1} 到 I_{*R2} 的范围内来取定的。电流 I_{*R2} 应当略大于电动机转矩等于静态阻力矩时的电枢电流，而电流 I_{*R1} 应当略小于电动机转矩等于最大容许启动力矩时的电枢电流。得到了电枢启动电流的容许波动范围（经

过几次試探性作图), 然后規定启动电阻的級数, 相应于从一条特性曲綫过渡到另一条曲綫的水平直綫的数目。在图 2 中得到三級启动电阻 R_{*1} 、 R_{*2} 和 R_{*3} , 表示三条机械特性曲綫 KH 、 MH 、 NH 和自然机械特性曲綫 PH 。

在額定电流 $I_{*n}=1$ 时特性曲綫之間的轉速相对跌落 (ab 、 bc 、 cd 和 de) 同时就是各級启动电阻或电樞电阻的标么值。这时

$$ab=R_{*n}, \quad bc=R_{*3}, \quad cd=R_{*2}, \quad de=R_{*1}.$$

綫段 af 就是电动机的标么值額定电阻 R_{*n} , 乘上基准值也就是欧姆电阻 R_{n0} 。因此各級启动电阻的欧姆值是

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R_{*1} R_{n0} \\ R_2 &= R_{*2} R_{n0} \\ R_3 &= R_{*3} R_{n0} \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ R_n &= R_{*n} R_{n0} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

全部启动电阻的欧姆值

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots\dots + R_n. \quad (8)$$

綫段 AF 就是空載运行轉速的标么值 n_{*0} , 乘以基准值, 得到有单位轉速 n_0 。因此短接各級启动电阻时的轉速 (用每分钟的轉数表示), 应当是

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= n_{*1} n_0, \\ n_2 &= n_{*2} n_0, \\ n_3 &= n_{*3} n_0, \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ n_n &= n_{*n} n_0, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中

$$n_{*1} = FE,$$

$$n_{*2} = FD,$$

$$n_{*3} = FC。$$

并激直流电动机的手动启动

并激直流电动机手动启动的原理接线图示于图3。电动机的启动过程如下。首先合上两极闸刀 P 和 $4P$ 。电动机开始转动以及按照机械特性曲线 KE 增加转速到达 E 点，相应的转速是 n_{*1} (图2)。

然后通过合上闸刀 $1P$ 短接第一级启动电阻 R_1 (图3)

因为系统具有惯量，电动机的转速不可能瞬时

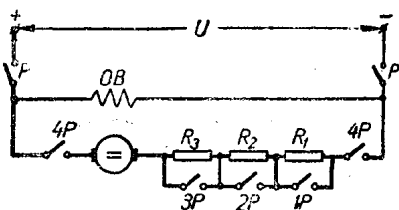


图3 并激直流电动机手动启动的原理接线图

改变，而启动电流的数值却迅速增长，所以是通过平行于横轴的直线 EM 过渡到新的机械特性曲线 MD 。

以后电动机将按着特性曲线 MD 升速一直到 D 点，对应于转速 n_{*2} 。这时合上闸刀 $2P$ 而过渡到特性曲线 NC 。启动的最后阶段合上闸刀 $3P$ ，这时过渡到自然机械特性曲线 PH ，所规定的转速对应于电动机的负荷电流 (或力矩)。其中到达对应于电枢电流 $I_{*n} = 1$ 的负荷时，电动机将工作于额定转速 n_{*n} ，等于线段 bf (图2)。

并激直流电动机的自动启动

自动启动直流电动机，就是通过专门的装置自动短接各

級启动电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 (图 3), 这种装置由接触器和继电器組成, 按照一定的接綫装配起来。图 4 中的实际例子是具有按照反电势函数三級升速的并激直流电动机自动启动的原理接綫图。

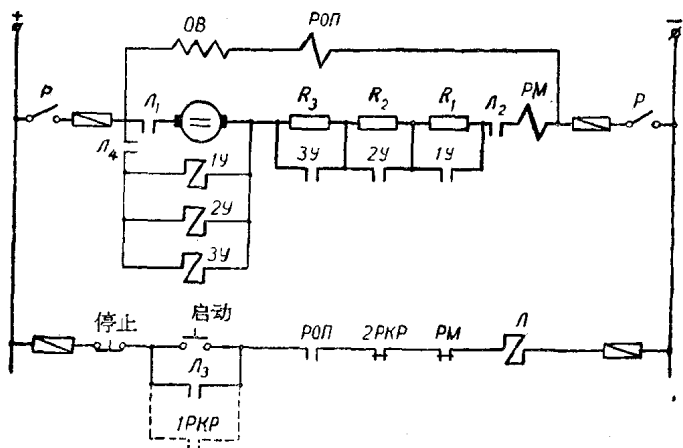


图4 按照反电势函数三级升速的并激直流电动机自动启动的原理接线图

J —具有过电流保护热继电器 PM 的磁启动器类型的线路接触器； $1Y$ 、 $2Y$ 、 $3Y$ —升速接点； R_1 、 R_2 、 R_3 —各级启动电阻； POH —磁场断开继电器；“启动”和“停止”—电动机手动启动和停止按钮； $1PEP$ —监察指定枢纽站工作状态的继电器或设备的接点，在整个的自动过程中用来自动启动电动机； $2PEP$ —监察电动机的机械的工作状态继电器的接点，用来自动停止电动机。

电动机的启动过程。合上闸刀 P 时电动机的激磁绕组 OB 得到电源。这时磁场断开继电器 POH 动作，它在线路接触器 J 绕组电路中的接点闭合因而准备好进行自动启动。

当通过“启动”按钮手动启动电动机，或者由于继电器 $1PKP$ 的接点闭合自动启动电动机都将接通线路接触器 J 的绕组的供电电路。后者动作，它的接点 J_1 和 J_2 ，将电动机的

电枢电路接于电网。同时接点 J_3 和 J_4 也闭合, J_3 的闭合短接了“启动”按钮, 保证线路接触器 J 的自保持, 而接点 J_4 接通了升速接触器 $1Y$ 、 $2Y$ 和 $3Y$ 的绕组。得到供电以后, 电动机的电枢开始转动, 沿着直线 KB 增加速度(图 2)。随着电枢转速的增加所建立的反电势也增加了, 因此作用于升速接触器 $1Y$ 、 $2Y$ 和 $3Y$ 绕组的电压也增加了(图 4), 一般它等于

$$U_{*Y} = E_* + I_{*R} R_{*R}$$

在 B 点(图 2), 电动机的转速到达 n_{*1} , 升速接触器绕组两端的电压等于

$$U_{*Y1} = E_{*1} + I_{*R2} R_{*R2} \quad (10)$$

式中 E_{*1} ——转速为 n_{*1} 时旋转电枢的反电势。在图 2 中线段 FB 表示相对于 U_* 的反电势 E_{*1} 。

如果选择升速接触器 $1Y$ 的动作电压等于 U_{*Y1} , 那么它将动作而短接电阻 R_1 , 过渡到新的机械特性曲线 MD (图 2)。

以后电动机将加速到 D 点, 相应的转速是 n_{*2} , 升速接触器绕组两端的电压上升到

$$U_{*Y2} = E_{*2} + I_{*R2} R_{*R2} \quad (11)$$

式中 E_{*2} ——转速为 n_{*2} 时旋转电枢的反电势。在图 2 中反电势 E_{*2} 表示为线段 FD 。

选择升速接触器 $2Y$ 的动作电压等于 U_{*Y2} , 那么在转速到达 n_{*2} 时它将动作而短接电阻 R_2 。工作状态过渡到机械特性曲线 NC 。

电动机的转速进一步提高而到达 C 点, 相应的转速是 n_{*3} , 升速接触器绕组两端的电压等于

$$U_{*Y3} = E_{*3} + I_{*R3} R_{*R3} \quad (12)$$

式中 E_{*3} ——轉速为 n_{*3} 时旋轉电樞的反电势。在图 2 中反电势 E_{*3} 表示为綫段 FC 。

同样应当選擇升速接触器 $3Y$ 的动作电压等于 U_{*3} 。那么在轉速到达 n_{*3} 时它将动作而短接电阻 R_3 。工作特性将过渡到自然机械特性綫 PH 。电动机的轉速将继续增加直到轉速对应于产生与机械阻力矩相等的轉矩的电樞电流时为止。其中，当轉矩对应于电流 $I_{*n} = 1$ 时，电动机轉速应等于額定值 n_{*n} ，对应于自然机械特性綫上的 b 点。

如果电动机在空載状态下启动，那么最后建立的轉速到达空載轉速 $n_{*x,x}$ ，对应于空載电流 $I_{*x,x}$ 时的綫段 gh (图 2)。

电动机的停止。电动机可以通过“停止”按钮手动停止，或者自动停止。电动机在各种事故情况下自动停止：如果由于不可容許的过負荷以至于过电流继电器 PM 动作而断开了綫路接触器 J 的繞組的供电电路；如果出现磁場切断，继电器 POH 失磁；在状态监察继电器 $2PKP$ 动作的情况下，它的接点也要切断綫路接触器 J 的繞組的供电电路(图 4)。

并激直流电动机按反电势的函数自动启动的計算方法是图解法。在三級和更多級升速的情况下解析計算法由于太复杂而不采用。

計 算 举 例

已知：并激直流电动机功率为 12 千瓦，725 轉/分， $U=220$ 伏， $I_{a,n}=62$ 安， $R_a=0.162$ 欧，按反电势函数自动启动，启动时带有 80% 額定負荷。

求：1. 在启动电流不超过两倍額定电流 $I_{a,n}$ 的条件下决定启动电阻的級数及电阻数值。

2. 求各級启动电阻被短接时电动机的轉速。

3. 决定升速接触器的动作电压。

解：电动机的空载转速按式(1)计算，等于

$$n_0 = n_n \frac{U}{U - I_{n,n} R_n} = 725 \frac{220}{220 - 62 \cdot 0.162}$$

$$= 725 \frac{220}{210} = 760 \text{ 轉/分}$$

或化为标么值，写作

$$n_{*0} = \frac{n_0}{n_n} = 1.$$

电动机的额定电阻

$$R_{n,n} = \frac{U}{I_{n,n}} = \frac{220}{62} = 3.55 \text{ 欧}.$$

这样相对于额定电阻的电枢电阻

$$R_{*R} = \frac{R_n}{R_{n,n}} = \frac{0.162}{3.55} = 0.046.$$

因此电动机的额定转速标么值按式(6)等于

$$n_{*n} = n_{*0} - R_{*R} = 1 - 0.046 = 0.954.$$

按两点的坐标

$$n_{*0} = 1, \quad I_{*R} = 0$$

和

$$n_{*n} = 0.954, \quad I_{*n} = 1$$

作出电动机的机械特性曲线，直线PH(图5)。

现在来求启动电阻的级数。这是由容许启动条件和电动机转子的容许启动电流波动来决定的。根据容许的波动经过几次试探作图，取定级数等于3。

这样

$$I_{*R1} = 1.95 < 2,$$

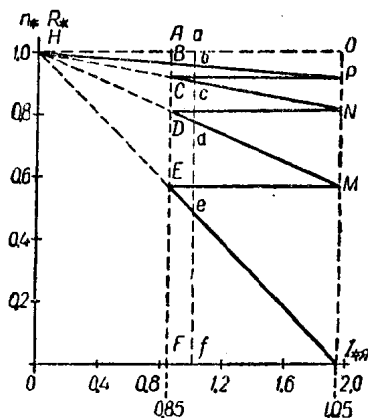


图5 并激直流电动机的机械特性

而

$$I_{*R2}=0.85>0.8,$$

式中 0.8——对应于给定电动机负荷的相对电枢电流。

各级启动电阻的标么值也就是各特性曲线之间的速度差，其值为

$$R_{*1}=de=0.295,$$

$$R_{*2}=cd=0.120,$$

$$R_{*3}=bc=0.054.$$

按式(7)求得这些电阻的欧姆值

$$R_1=R_{*1}R_{\mu,n}=0.295\cdot 3.55=1.05\text{欧},$$

$$R_2=0.12\cdot 3.55=0.425\text{欧},$$

$$R_3=0.054\cdot 3.55=0.192\text{欧}.$$

全部启动电阻

$$R=R_1+R_2+R_3=1.050+0.425+0.192=1.667\text{欧}.$$

当各级启动电阻被短接时的转速，可以由图5根据关系式(9)得到，

$$n_1=n_{*1}n_0=0.57\cdot 760=433\text{转/分},$$

$$n_2=n_{*2}n_0=0.81\cdot 760=615\text{转/分},$$

$$n_3=n_{*3}n_0=0.92\cdot 760=700\text{转/分}.$$

升速接触器1Y, 2Y和3Y的动作电压按式(10)、(11)和(12)决定，得到

$$U_{*Y1}=E_{*1}+I_{*R2}R_{*R}=0.57+0.85\cdot 0.046=0.57+0.039=0.609,$$

$$U_{*Y2}=E_{*2}+I_{*R2}R_{*R}=0.81+0.039=0.849,$$

$$U_{*Y3}=E_{*3}+I_{*R2}R_{*R}=0.92+0.039=0.959.$$

这些电压的伏特数为

$$U_{Y1}=U_{*Y1}U=0.609\cdot 220=134\text{伏},$$

$$U_{Y2}=0.849\cdot 220=187\text{伏},$$

$$U_{Y3}=0.959\cdot 220=210\text{伏}.$$

第二章 根据自启动条件计算不切除电动机的功率

概 論

所謂异步电动机的自启动就是，当电网发生短路或者短時間失去电压而使电动机的轉速降低时，电动机并不断开，在电压恢复以后自行启动，直到轉速重新到达額定值。不仅短路轉子式异步电动机容許进行自启动，而且那些具有启动装置的繞綫式异步电动机也容許自启动〔參6〕。

对于那些具有不容許工作中断的負荷的电动机來說，自启动具有特別重要的意义。这些負荷也包括发电厂的一切重要自用机械。通过电动机的自启动大大提高了发电厂自用机械工作的可靠性。

如果由于电网发生短路而造成电压降低，这时电动机轉速下降，它的阻抗急剧减小。所以当电压恢复时电动机的启动电流增大，在联接于电源和电动机之間的阻抗上造成很大的电压降。电动机端的恢复电压可能小于使电动机轉子到达額定轉速的必需数值。結果不可能保証所有电动机的自启动，而只能保証它們中間的一部份。自启动电动机的功率应当由計算决定。

實踐中，力图保証尽量多的重要机械的电动机能够自启动。因此为了有利于重要电动机組基本部份的自启动，当电压降低到額定值的60~70%时，从自用汇流排上自动断开：

- 1, 所有不重要机械的电动机；