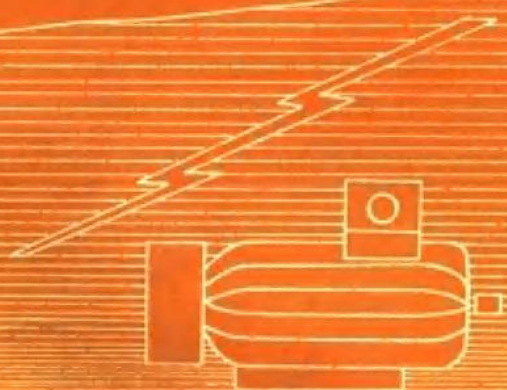


DIANGONG
JISHU

电工技术



4

科学技术文献出版社重庆分社

工厂自备发电站的节能

石川元祐 山崎敏

前言

目前,工厂自行发电就是把发电与工厂的蒸汽系统和废热利用系统连成一体,成为合理使用热量的节能体系,而且参予自行发电的诸用电户都为提高其发电效率终日不断地动脑筋改进,因此一般说来,可称得上以最高热效率进行运转的理想工厂。

在这样的工厂中,为了今后进一步飞跃地节约能量,准备引进据说可使总体系统节约能量的先进设想,使用所谓更低温度的废热回收新技术,广泛进行热的利用。但是,就在推广使用这些新技术和新设想之前,人们还得想方设法,花很少一点时间来改变旧观点,利用早在这些新设想之前即已存在的原有技术,扎扎实实地实现能量节约。本文拟对这样自行发电的工厂的节能进展方面介绍一下三菱公司的看法,供参考。

一、自行发电的现状

随着工业设备的扩建,自行发电都是采用最适合其生产方式的方法,给生产工厂提供稳定而便宜的蒸汽和电力,从而就产生了各式各样的发电设备。譬如,以任一工厂为例,为了提高热效率,几乎没有一个事例会去单独设置热效率差的纯凝汽式汽轮机(除非废热和废燃料确已毫无价值),即使是装设背压式汽轮机、多级抽汽的凝汽式汽轮机、混压式凝汽汽轮机的例子也不多,却要想尽各种办法去设置燃气轮机、联合循环、鼓风—发电联用汽轮机等。当然,从现状来说,还不一定是单独具备上述这些装置,因为如果工厂中由于节能而减少耗汽量时,则这些设备即使在设置时刻已发挥其经济性,也

仍会损害工厂内蒸汽—电力的平衡,不能进行切合于工厂蒸汽系统的运行,结果只能是使运转效率减低和厂内发电量减小下来。

就生产工厂方面来说,正在重新估价工厂的废热利用。可是,如果只限于一个工厂来考虑时,则由于用到加热、冷却等的耗热量要比废热量少得多,所以也谈不上把废热回收成蒸汽加以利用的问题了。因此明摆的状况是要探索出从废热中直接发电的高效率方法。

下面将阐明处于这样状况下自行发电的问题和以原有技术便能对付的发电设备的基本措施,接着还要述及一些有关废热发电的未来措施。

二、自行发电的节能

2.1 节能的基本方法

如前所述,为了自行发电,各种型式的发电设备都可作为工厂蒸汽系统的一项环节来使用的,因此为改善发电设备由于现有蒸汽—电力不平衡而降低了效率和出力起见,最好是进行设备的小改动和增添些小型设备,使之成为能与蒸汽系统构成一体的最合适体系。因而,有如下四种作为基本方法的相应措施:

- (1) 以小型背压式汽轮机来利用减压蒸汽;
- (2) 对发电汽轮机进行内部小改造;
- (3) 以低压凝汽式汽轮机来回收剩余蒸汽;
- (4) 针对复合式发电设备引用最合适的运转方法。

下面将阐述此四种方法的特征。

第一种措施——以小型背压式汽轮机来利用减压蒸汽

把原来已有的汽轮机抽汽或发电锅炉的一部分主蒸汽经过减压减温后送到工厂或热交换器中去的送汽装置。在此情况中当然要依靠小型背压式汽轮机使相同于减压阀低压侧的汽压自动控制不变，就必然可把减压的能量利用到发电上面去了，但这只有在发展了适合此种用途的小容量汽轮机，才可能使这种减压能量经济地用于发电。图1示出此种用途的汽轮机这一相应措施的实例，利用从30公斤/厘米²减压到14公斤/厘米²的蒸汽量43.5吨/时，发出电量1300千瓦。

供这种用途的汽轮机特征，是一种速度约达到柯蒂斯（Curtis）复速级的高速汽轮机，它与感应发电机紧凑配置在同一平台板上，因此可简化运输和安装，节省配置空间。图2示出以减压阀前汽温为参变数的情况下利用本措施得出的发电量随同减压阀前后压比而变的大致标准。

采用这一措施后，由于其装置效率高达80%甚至90%，根据燃料价格便宜和汽轮机设计得颇经济，约一年便可收回成本，因此如果能通过工厂内综合工程把减压蒸汽汇集在一起的话，就值得立刻设置这种设备。

第二种措施——发电汽轮机内部小改造

如果背压式汽轮机处在50%负荷以下，则其效率就大为降低。这样一来，在工厂蒸汽量大幅度减少的情况下，如果把汽轮机内部喷嘴和叶片变换成适用于小流量的并以此对汽轮机进行小改造的话，那么出力较小时的效率便可改进，使低负荷时的出力增加。

表1和图3示出实行本措施的实例。由于把容量从最大出力6500千瓦改造成3550千瓦，使汽轮机在其通流汽量（工厂蒸汽量）为65吨/时时，从改造前的出力为3111千瓦增加到3672千瓦；在50吨/时时，从改造前出力为1776千瓦增大到2553千瓦（上述任一数值都是改造之前和之后的实测值）。图4示出背压式汽轮机的通流汽量（工厂蒸汽量）与发

电量的一般关系。若把背压式汽轮机的发电量作为AA'，空载蒸汽量取为额定出力蒸汽量的c%时，则背压式汽轮机的部分负荷特性y可大致近似为

$$y = \sqrt{a(x-c) + \beta^2} - \beta$$

由这一改造所增加的出力 Δy 就是 $y = x$ 与上式的差值，也即

$$\Delta y = -\sqrt{a(x-c) + \beta^2} + (x - \beta)$$

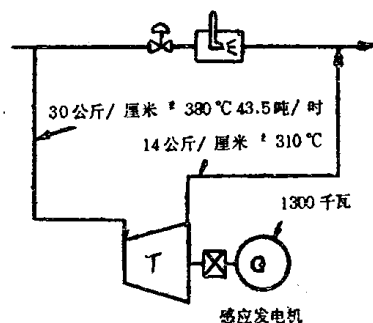
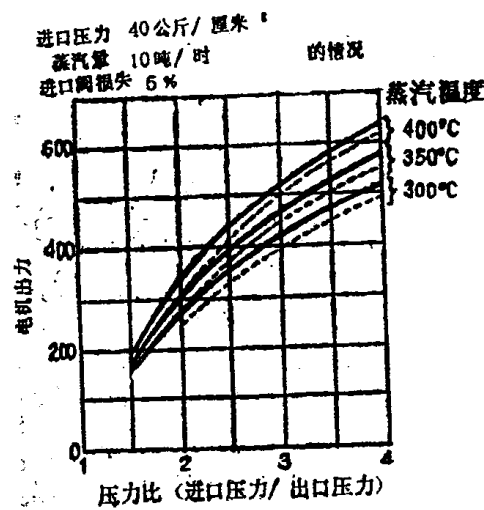


图1 以小型背压式汽轮机来利用低压蒸汽的实例



随进口压力而变的出力修正系数

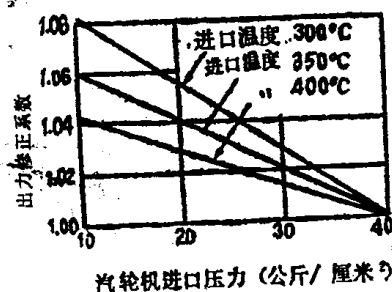


图2 减压阀前后压力与发电机出力的关系

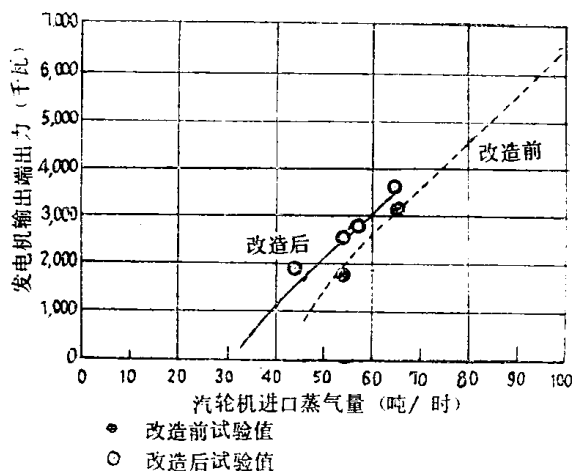


图3 以发电汽轮机内部小改造来改进低负荷效率的措施结果

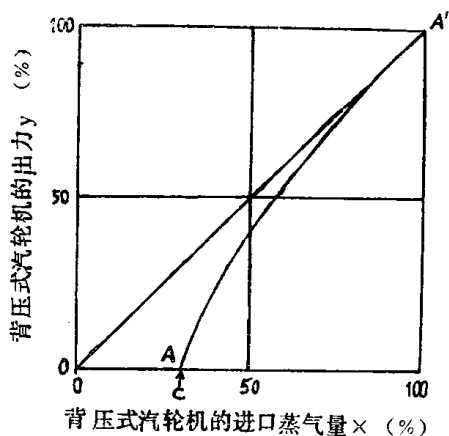


图4 背压式汽轮机的汽耗特性

表1 以发电汽轮机内部小改造来改善低负荷效率的措施结果

		改造前	改造后
最大出力	(千瓦)	6500	3550
最大蒸汽量	(吨/时)	102.5	65.0
蒸汽参数	进口压力(公斤/厘米 ² ,表压)	69	
	进口温度(℃)	430	
	排汽压力(公斤/厘米 ² ,表压)	20	
65吨/时 时的出力 (千瓦)		3111*	3672*
54吨/时 时的出力 (千瓦)		1776*	2553*

* 表示实测值。

图5示出采用本措施把空载蒸汽量作为额定出力值的30%和40%时所增加的出力值。如果空载蒸汽量作为30%时,使工厂蒸汽量减少50%的情况下采用本措施可增加出力

约10%,而在工厂蒸汽量小于50%以下时出力就急剧地增大。若效率一下子得以改善约10%,那么就on能作为投资对象,因此若使背压式汽轮机通流汽量(工厂蒸汽量)成为约50%的话,本措施就值得研讨的了。

这样增加的电力,与前述例子一样,都是在燃料补加量为最小时把节省下来的能量百分之百地变成为电力,此外,实现本措施的改造工作因其规模极小,即使在定期检修中也能容易实现,因此在汽轮机的通流汽量(工厂蒸汽量)减少且工厂用电量也减少的情况下(预料这种状态可持续约一年左右),本措施就算得上是一种具有极大经济性的节能措施。

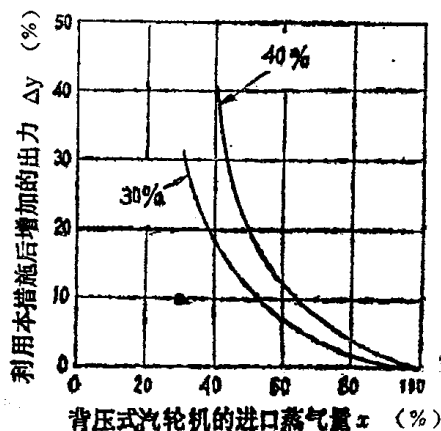


图5 以发电汽轮机内部小改造来增加出力
图中的%表示无载时的蒸气量

表2和图6示出这一措施的改造范围,上述例子就是表2中改造项目B的情况。本措施,即使改造范围是在同一表2改造项目B的情况下,也属于成本偿还期为最短(不到一年)的节能措施。

第三种措施——以低压凝汽式汽轮机来回收剩余蒸汽

上述实例是一项对付背压式汽轮机的通流汽量(工厂蒸汽量)已减少且工厂用电量也减少的情况下的措施。但是一般说来,较多的情况是工厂用汽量减少而工厂用电量却并不减少。这种情况对上述第二种措施来说,其结果是不经济的:连那些原先并不空闲的设备也都空闲下来了。因此,就值得探

讨既能有效利用原设置的设备来增强发电又能改进原设置设备来节省能量的这种第三措施。

图7示出采用本措施的实例。由于设置了进汽量为52.2吨/时、出力为 4500千瓦的 低

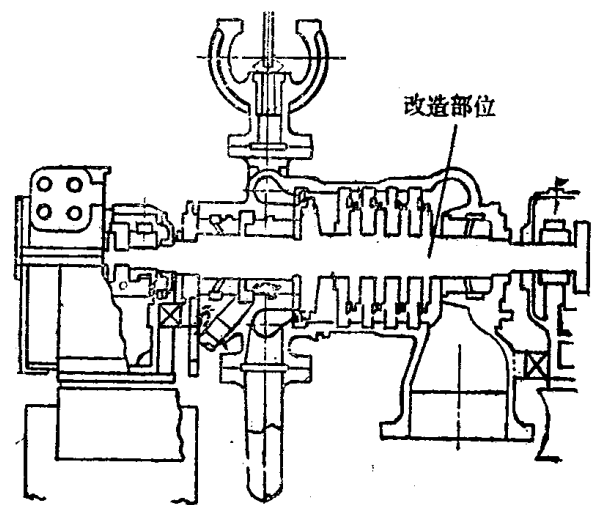


图 6 改造工作说明图

表 2 改 造 工 作 范 围

改 造 部 位		备 注
改造项 A	修改一部分喷嘴	改造工作费用便宜
改造项 B	新造用于低出力的 喷 嘴	汽轮机效率要比改
	新造用于低出力的 叶轮转子	造项A更有所提高
现场改造工作期限		利用定期检修期间 就 有 可 能

压凝汽式汽轮机，使原设置的背压式汽轮机的出力增加了13050千瓦，与新设置的凝汽式汽轮机的出力合在一起的话，出力共增加了17550 千瓦。这就是说，若考虑到所发出的电力约为新设置的凝汽式汽轮机容量的四倍时，此新设置的凝汽式汽轮机在建设费用方面的建设单价相当于约缩小到 $\frac{1}{4}$ ，而且在热效率方面，虽则未把100%的节能都发成电，但如后所述，仍可达到颇高的热效率，因此可以说，本措施也是一种十分经济的节能措施。

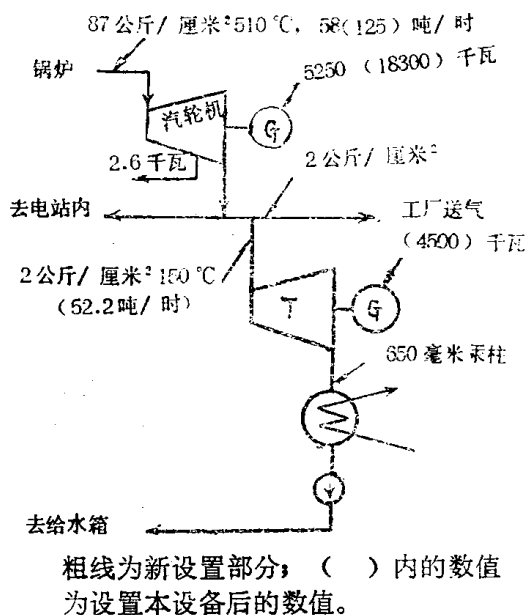


图 7 低压凝汽式汽轮机的设置实例

表 3 设 置 低 压 凝 汽 式 汽 轮 机 后 的 结 果

	原设置的背压式汽轮机		采用了低压凝汽式汽轮机的合理措施后	
	设置之时	现 状	措 施 后	增 额 率
① 原设置背压式汽轮机的流入汽量	100%	32.2%	69.4%	37.2%
② 原设置背压式汽轮机的发电量	100%	20.2%	70.4%	50.2%
③ 增设凝汽式汽轮机的流入汽量	—	—	29.0%	29.0%
④ 增设凝汽式汽轮机的发电量	—	—	17.3%	17.3%
⑤ 原设置与增设置后的总共发电量	—	—	87.7%	67.5%
⑥ 电力增加比⑤/④	—	—	5.1	3.9

〔注〕 对于蒸汽和发电量的份额，是以原设置的背压式汽轮机诸原值为100%来计算的。

表3示出在实施本措施前后的各因数的变化。

(1) 本措施的热效率
一般说来，由于低压凝汽式汽轮机热效

率较差,想必会与节能有矛盾,但工厂内节能结果表明,在所述蒸汽—电力发生不平衡的情况下,凝汽式汽轮机由于能消除这一不平衡,反而能意外地发挥其改进工厂热效率的效果,这种情况是很多的。

设置背压式汽轮机时的基本循环如图8所示为ABCD,但如果由于前述蒸汽—电力不平衡使工厂蒸汽量减少时,就成为同一图8上的ABCE那样的循环了。在背压式汽轮机部分负荷下产生的熵增($S_e - S_d$),在以排汽作为工厂蒸汽用于加热的情况中,往往被考虑成好像可能予以有效地利用的那样,但是在工厂的部分用电是依靠厂外电源的情况下,不一定能把电输送出去。这就是说,如果考虑到厂外电源也是在其发电场所把熵增部分排放给海水进行发电的话,那么就工厂方面来说,是把能用作电力的热量耗用于徒劳无益的熵增,此外,在厂外都是使用在发电时有熵增的电力,要使本厂内的蒸汽—电力平衡下来,反而不一定是一种难以有效利用能量的情况了。本措施就是为了防止由于背压式汽轮机部分负荷发生熵增,要让背压式汽轮机中有尽量多的蒸汽流过,为此把工厂用不了的部分蒸汽放在低压凝汽式汽轮机中处理,以此进行发电,达到既可有效利用原设置设备,又可增强自行发电能力使整体能量都能有效地利用起来的意图。

(2) 低压凝汽式汽轮机特性的试算实例

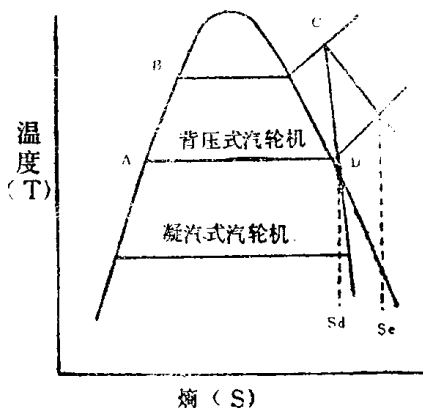


图8 背压式汽轮机的循环

(a) 发电量无限制的情况

图9示出本措施在工厂蒸汽量从G减少

到G'情况下的效果。这就是说,此图表示出,使工厂蒸汽减少量($G - G'$)流过设置在原有背压式汽轮机排汽管路上的低压凝汽式汽轮机,从而使背压式汽轮机的膨胀过程回到原先状态。

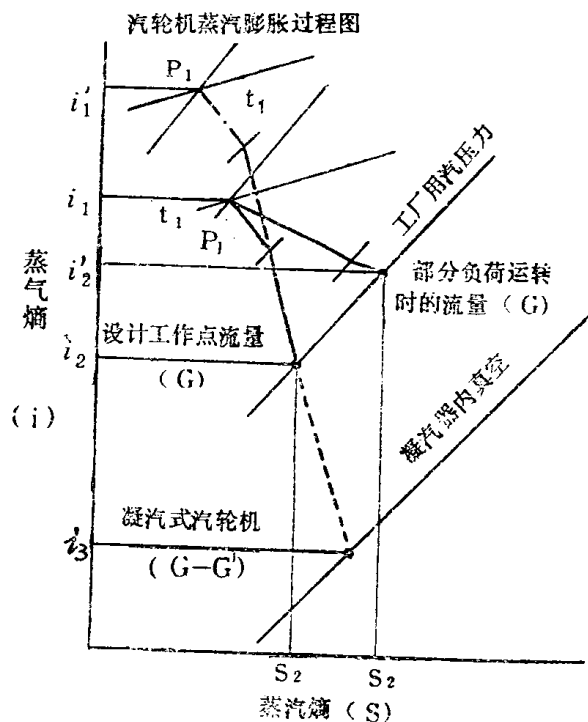


图9 设置低压凝汽式汽轮机后背压式汽轮机、凝汽式汽轮机的蒸汽膨胀过程图

图9中依靠本措施使补加入的蒸汽量($G - G'$)从 i_2 膨胀到 i_3 ,与此同时, G' 的膨胀过程就从($i_1 \rightarrow i_2'$)改善为($i_1 \rightarrow i_2$)。这就是说,补加蒸汽的热膨胀为($i_1 \rightarrow i_3$),但其结果却具有使高压高温蒸汽从 i_1' 进一步膨胀到 i_3 为止的同样效果。至于这一 i_1' 值可表达如下:

$$i_1' = i_1 + (i_2' - i_2) \times G' / (G - G')$$

(这里为简化计,背压式汽轮机、凝汽式汽轮机的发电机效率、汽轮机的机械损失率都假定为相同的。)

举一个实例,假设进口蒸汽为100公斤/厘米²、510℃、背压为30公斤/厘米²(或20公斤/厘米²)的背压式汽轮机处在部分负荷的情况下,且空载蒸汽量为额定出力时的30%,则依靠本措施的补加蒸汽的效果就好像是相同于从160公斤/厘米²、580℃(或180

公斤/厘米²、600℃) 膨胀到真空的效果。

以上示出经过简化的计算实例，目的是为了从概念上突出低压凝汽式汽轮机的效果，但是在实际上，给水加热问题以及如果工厂能如此无限发电，则发电量过大，也会出现情况不良的问题。

(b) 发电量受限制的情况

下面介绍一个适合现实循环的研讨实例，其有关情况是把发电增加量限制在某一程度，使之在实现本措施后发出的总电量等于原设置的汽轮机额定出力，并以比前述 (G-G') 为小的流量经过增设的凝汽式汽轮机。

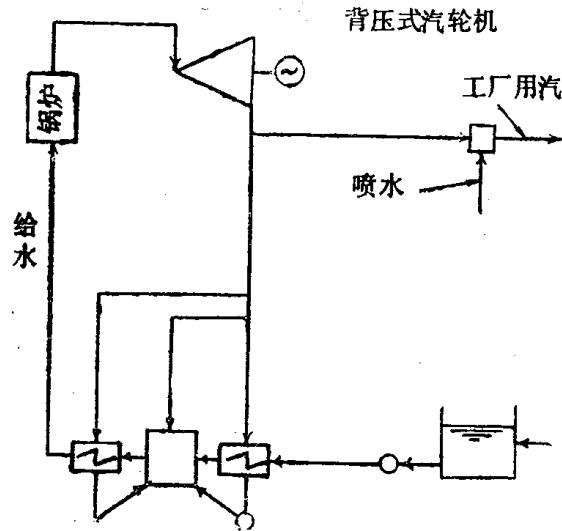


图10 作为研讨基础的背压式汽轮机装置系统图

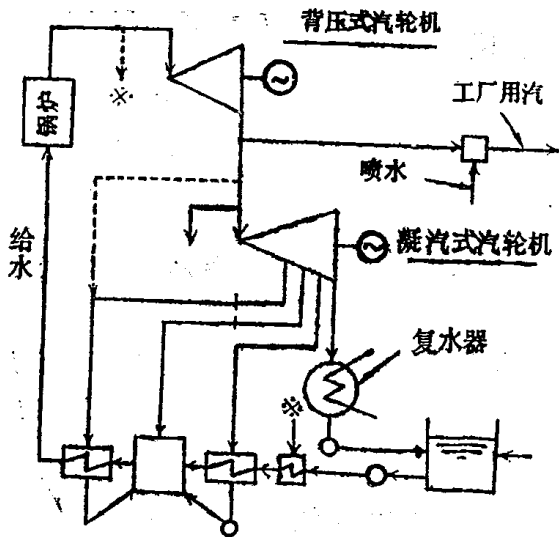
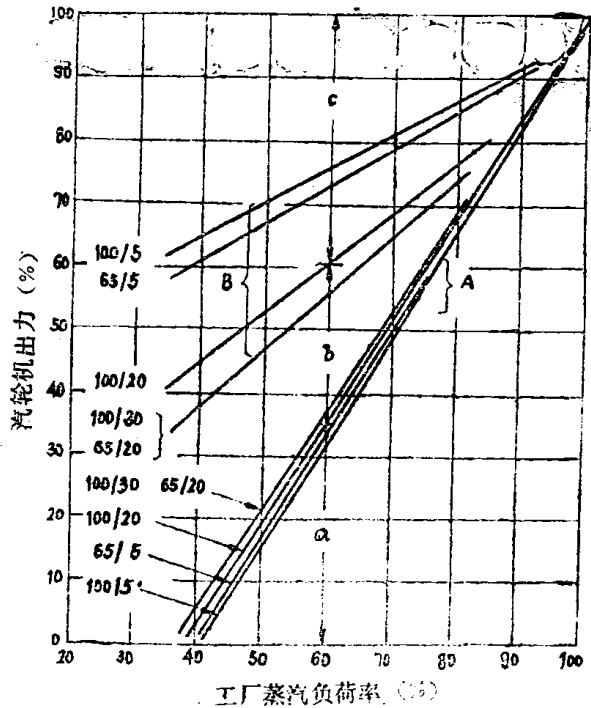


图11 把低压凝汽式汽轮机设置于背压式汽轮机装置中的装置系统图

图10示出以原设置的背压式汽轮机为研讨基础的装置图，图11示出图10中设置低压凝汽式汽轮机的情况，表4示出所研讨的五项蒸汽参数的假设条件。研讨结果如图12、图13中所示。

在工厂用汽量减少而厂内需电量仍假定不变时，为了要补充背压式汽轮机出力的减少并使总发电量回到原样起见，应设置凝汽式汽轮机，图12就示出这种汽轮机的容量最



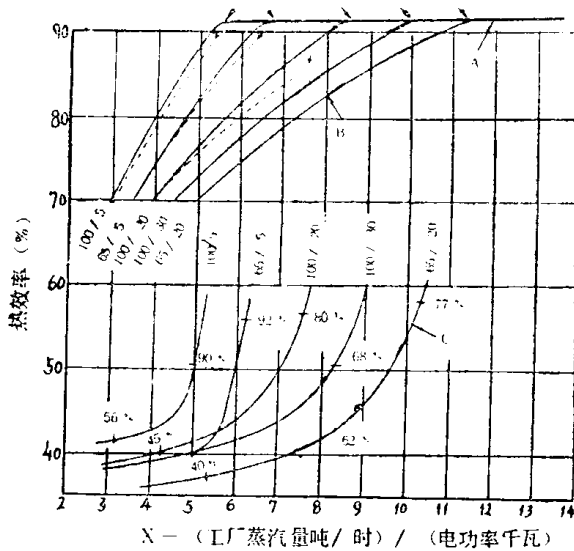
A: 背压式汽轮机出力 (a)
B: 以设置凝汽式汽轮机来恢复背压式汽轮机的出力 (a + b)
(c为低压凝汽式汽轮机的出力，c = 100 - a - b)
图中所示数值为背压式汽轮机的主蒸汽压力/背压

图12 相对于工厂蒸汽负荷率而变的背压式汽轮机与所需低压凝汽式汽轮机的出力关系

表4 背压式汽轮机装置蒸汽参数的假设条件

进口蒸汽	压力	公斤/厘米 ³	100	65
	温度	℃	510	450
排汽条件	压力	公斤/厘米 ³	30	—
			20	20
			5	5

各蒸汽参数下的背压式汽轮机的计划工作点 (a)



- A: 背压式汽轮机热效率
 B: 设置 低压汽轮机的情况下的综合热效率
 (虚线为未实行设置低压汽轮机措施的情况下与厂外电源并列运转时的热效率)
 C: 补加蒸汽的热效率
 图中数字表示为: 背压式汽轮机的主蒸汽压力/背压 以及实行本措施时的工厂蒸汽负荷率 (%)

图13 设置低压凝汽式汽轮机的措施在实行和不实行时的综合热效率以及采用本措施的补加蒸汽热效率

好应有多大(此处,汽轮机的空载蒸汽量算作额定出力的30%,背压式汽轮机的部分负荷特性当作直线来计算。))。

在同图12中, a 表示原设置的背压式汽轮机在前述每一蒸汽参数下相对于工厂蒸汽量变化(送汽温度固定不变)的部分负荷特性, c 表示出应当设置的凝汽式汽轮机的容量。图中的 $b(b = 100 - a - c)$ 是原设置的背压式汽轮机在实行本措施后的出力增加量。换言之,若工厂蒸汽量减少,背压式汽轮机的出力就从100变成为 $a\%$,为补充其出力不足,凝汽式汽轮机的容量不应是 $(100 - a)$,而最好是 $c\%$ 。这就是说,下式数值

$$\frac{100 - a}{c} = \frac{b + c}{c}$$

在鉴定设备投资效率好坏的同时也鉴定了热效率的好坏。此值将随着原设置的背压式汽轮机在现状下的部分负荷率而有所变动,除此之外,此值还受蒸汽参数的重大控制。表5

示出这一变化关系。图13比较了已设置和未设置凝汽式汽轮机情况下的综合热效率,并表示出由于实行本措施后补加蒸汽的热效率等情况。

在同一图13中,直线A与各蒸汽参数曲线B的交点a的X值(X_a)就是背压式汽轮机计划工作点上的蒸汽与电力的比值。从这一状况出发,如果工厂蒸汽量减少,则背压式汽轮机的出力也要减少。这一情况可理解为工厂整体中的蒸汽—电力成为平衡,如果厂外供电量不变,则只要增大X值,便可使热效率不变,但蒸汽—电力就变成不平衡,反之,若厂外的供电量有所增加(这里,连这种状况也考虑到了),那么蒸汽/电力的比值要减小,使热效率降下来。图中曲线B的虚线就是在未实行本措施时不足的电力部分靠厂外电源供应时(已把上述那种状况包括在内)所计算出的综合热效率(计算时假定厂外电源的热效率为40%),曲线B的实线是在实行本措施后的综合热效率。例如,主蒸汽为100公斤/厘米²、510℃,背压为20公斤/厘米²的背压式汽轮机(在此蒸汽参数下背压式汽轮机内X为8.3)是处在部分负荷($X = 7.6$)下,并由热效率为40%的厂外电源供电,在此情况下的综合热效率为86%。此外,在实行本措施的同时不接受厂外电源的供电、仅采用凝汽式汽轮机和靠它来恢复背压式汽轮机的出力时,则在 $X = 7.6$ 的情况下综合热效率将为89%。

对比一下曲线B的虚线与实线,可看出,无论哪一蒸汽参数情况下实行本措施后的综合热效率要比不采用任何措施只接受热效率为40%的厂外供电的情况好得多。而且如前所述,鉴定设备投资效果的 $\frac{b+c}{c}$ 值是很大的(如表5中所示),也就是说,容量小的凝汽式汽轮机可大大增加电力,可以看出,本措施甚至是一种使设备经济性得到改善的方法。

图13曲线C表示出补加蒸汽热效率究竟

表 5

设置低压凝汽式汽轮机的特征

背压式汽轮机的蒸汽压力	进 口 出 口	公斤/厘米 ² 公斤/厘米 ²	100 30	100 20	100 5	65 20	65 5	备 注
投资效率的标准	$\frac{b+c}{c}$	—	1.4	1.7	2.8	1.4	2.4	工厂蒸汽负荷率为60%的情况
与厂外电源并列运行时的热效率	%		82	79	73	82	75	同 上
实行本措施情况下的热效率	%		83	81	74	83	75	同 上
实行本措施情况下补加蒸汽的热效率	%		45	43	42	42	39	同 上
与厂外电源并列运行时的热效率	%		85	83	78	85	80	工厂蒸汽负荷率为70%的情况
实行本措施情况下的热效率	%		87	85	79	87	80	同 上
实行本措施情况下补加蒸汽的热效率	%		52	48	43	48	40	同 上

能达到何等大小。在前述发电不受限制的情况（可使厂外供电量减少下来的情况）下补加蒸汽的热效率不会随着工厂蒸汽负荷率有太大变化的，但在发电受到限制的情况（厂外供电量不能增减的情况）下补加蒸汽的热效率是随着工厂蒸汽负荷率变化的。为了表示出这一热效率值所处的工厂蒸汽负荷率的数值究竟有多大，曲线C上的数值都已附记出相应X值所处地位的数值。

例如在主蒸汽为100公斤/厘米²、510℃、背压为20公斤/厘米²的背压式汽轮机中，工厂蒸汽负荷比计划上的数值减少20%而成为80%负荷（X=8.3成为X=7.6）了。可以看出，使用本措施的补加蒸汽热效率为57%（锅炉效率取为92%）。这样便可知道，使用本措施的补加蒸汽热效率将变得很高，视原设置的背压式汽轮机状况如何而定。上述结果仅显示出本措施效率是较好的一个计算实例而已，未必在一切工厂中都可得到如此高效率的，但在实际装置中也确要根据蒸汽参数才能达到颇高的效率。

设置低压凝汽式汽轮机，一般说来其热效率差，建设费用也比较高，往往都避而不用，但如上所述可以知道，本措施是一项使设备既在热效率方面又在经济性方面均能改进的措施。

第四种措施——针对复合发电设备引用最合适的运转方法

在整个发电站是由各种型式的汽轮机和

锅炉所构成的情况下，如果工厂的蒸汽和电力因来自生产设备方面的要求而有重大变化的时候，则按照蒸汽和电力需求将使发电站不易进行最经济的运转。对于这样的情况，若把各机组性能存贮入计算机中，用计算机使整个发电站的燃料消耗量成为最少并以此来调节全部发电站的话，那么就有可能使发电站进行经济运转。若能利用计算机，则依靠经济运转控制方法使各汽轮机自始至终都在接近阀参数下运转，由于改进了整个装置效率，便可实现能量节约。

计算机的使用在其它方面也还有许多特点：可减少厂外购电量，控制住需求量，因安全而可控制可靠性，可省力等附带效果，在经济上也是可接受的节能措施之一。

2.2 特殊的节能发电

在前一小节中已阐明了综合现有状况下的原有技术便可解决发电设备的各项措施，但在将来还必须更为严格地推行节能。为此，想必应当进一步推陈出新。作为出新的—种，拟探讨一下前述从中低温废热中直接以较佳效率发电的方法。有关这样的特殊节能发电的问题在本文有限的版面范围内略予说明之。

(1) 特殊的节能发电问题

目前除常用的蒸汽轮机以外下列一些正在制造和设计的机械也可作为节能发电设备来使用：(a) 工业废气的膨胀汽轮机；(b) 利用液化天然气中超低温的二元循环；(c)

利用中低温废气内废热的闪蒸透平及二元循环。

这些特殊的节能发电设备是与工厂的生产设备直接有关的，因此无论在怎样的事态下切勿对生产设备有所影响，此外，设备价格必须低廉，务必能在极短时期内给予偿还。前一问题属纯技术问题，如果对有关各种设备都作出这样恰当的处理，那就毫无问题了，但有关后一个问题，即使在现在也未必见得已完全解决。

(2) 各种节能发电设备的建设费用

节能设备在建设费用方面可分成下列两大类：(a) 要从废能中直接回收对其工厂有用的有效能；(b) 从废能中经过一次转换成为其它能量形式后才可回收对其工厂有用的有效能。

在上述(1)中的(a)属第一大类，在(1)中的(b)和(c)属第二大类。在图14中示出这些实例的大致建设费用的关系

如同一图14中所示，在第一大类与第二大类之间随着设备型式差异的建设单价相差颇大，偿还年数一到二年，以经济基数线为界上下分开。至于第二大类的特殊节能发电设备，为使偿还年数于最短期内结束，今后有必要在建设费用方面作出一定努力。

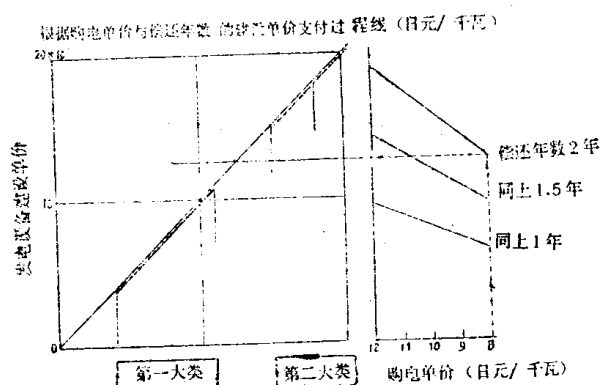


图14 各节能机械与发电设备的建设单价

(3) 特殊节能发电装置的今后发展

在特殊的节能发电装置中，由于仍着眼在建设费用方面，因此属于第一大类的已决定要实施的设备就应为其实施进行充分准备。另一方面，属于第二大类的设备还有待

表 6 利用废热发电的方式

发电方式 废热温度	集中发电	分散发电	注
高温废热	A	A	约400℃以上
中温废热	B	B	
低温废热	B	C	约200℃以下

A：利用水蒸汽的蒸汽轮机方式

B：加压的热水式汽轮机方式

C：利用低沸点载热体汽轮机方式

于今后更多的研究。

在生产能量的企业代表——电力公司和煤气公司中，从所谓有效利用能量观点来看，有关利用液化天然气超低温的二元循环正朝着逐步实现的方向进行研究。

对自行发电的工厂来说，估计今后有必要去推行中低温废气的废热回收及其利用。关于废热回收，究竟要用所谓集中利用方式还是分散利用方式是有待讨论的，但就其结论来说，表6所示方式可予考虑之。幸而，就技术方面来说，作为中低温废热回收技术的有热水利用系统和二元循环，日本独创的热水式地热发电已可举出很多成果。此外，地热二元循环的研究也正在收到成效，因此今后有必要以这些为基础，努力去降低建设单价。可是如前所述，为使其建设费用相对于短期偿还年数来说能纳入经济基数，还得作出相当大的努力，今后，制造厂家的价格当然应当降下来，但这也得多多依赖于与用户方面的节能有关的设备的综合工程，今后用户—制造厂家形成一体向节能方面迈进，大概是势所必然的。

结 语

能自行发电的工厂，就工厂本身来说，其节能装置是最为优越的了，但由于最近的蒸汽—电力不平衡，出现了使其效率降低、出力降低的现象。针对这一倾向可以用原有主要节能机组来处理，使节能达到眼前还不曾有过的最佳化地步。

还有，就现状来说，尚要把未达到经济

轧制生产中节约用电的问题

Мугалимов Р. Г., Харченко Г. Н., Попов В. К.

在轧制生产中，开坯轧机是用电量最大的设备。这样，对板坯初轧机或现代化开坯机来说，仅主电气传动装置的功率即约达二万千瓦。这类轧机的技术经济指标和能源利用效率是与轧制过程的控制方法和主、辅电气设备的运行方式紧密相关的。

马格尼特戈尔斯克冶金联合企业在生产中试验并推广控制轧制过程和1150板坯初轧机主电气传动装置运行方式的新方法，从而提高了该轧机的生产率并大大节约了电能。以往控制轧制过程的方法在卧式和立式基座轧辊的所有轧制道次中同时考虑金属的轧制。此时，在每一轧制道次中，被轧金属实现与板坯初轧机轴间距离相等的附加行程。板坯初轧机主电气传动装置以空转方式作了与此相同的附加行程（表示为开坯轧辊的转数），从而引起非生产性电能消耗。在一个轧制周期中，主电气传动装置空转（按梯形速度图）运动的总时间 T_{x1} 公式为：

$$T_{x1} = \sum_{i=1}^N t_{xi} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{2\alpha_i l_0 - v_{maxi}^2 - v_{3i}^2}{2\alpha_i v_{maxi}} \right), \quad (1)$$

式中： t_{xi} ——在第*i*个轧制道次中，主电气传动装置空转运动时间； N ——在一个轧制周期中的道次数； α_i ——在第*i*个轧制道次中，主电气传动装置的加速(减速)度； v_{maxi} ——在第*i*个轧制道次中，最大的轧制速度； v_{3i} ——在第*i*个轧制道次中，轧辊使金属的轧入速度； l_0 ——板坯初轧机立式基座轴和卧式基座轴之间的距离。

在新的控制方法中，将所有轧制道次划

分为共同的和单独的两种。所谓共同道次，是金属在卧式机座和立式机座的轧辊中同时轧制，而单独道次则是金属仅在卧式轧辊中轧制。这样，在单独道次中，被轧金属和板坯初轧机的主电气传动装置将不完成等于轧机轴间距离的那个附加行程。从而一方面减少了轧制周期的持续时间 T_{Π} 并提高轧机的效率，在另一方面，由于消除每一单独道次中主电气传动装置空转的运动行程，从而节约了电力消耗。对于新控制方法来说，每一轧制周期中空转的总时间 T_{x2} 的公式为：

$$T_{x2} = \sum_{i=N-N_p}^N \left(\frac{2\alpha_i - v_{maxi}^2 - v_{3i}^2}{2\alpha_i v_{maxi}} \right), \quad (2)$$

式中： N_p ——单独轧制道次数。

当利用新的控制轧制过程的方法时，主电气传动装置的空转运动时间将减少为：

$$\Delta T_x = T_{x1} - T_{x2} = \sum_{i=N_{B.\Gamma}}^N \left(\frac{2\alpha_i l_0 - v_{maxi}^2 - v_{3i}^2}{2\alpha_i v_{maxi}} \right), \quad (3)$$

式中： $N_{B.\Gamma} = N - N_p$ ——金属在板坯初轧机立式轧辊和卧式轧辊中同时压下的共同轧制道次数。

共同道次和单独道次之间的最佳比值是在计算压下量和主电气传动装置静负荷时确定的。

利用新的控制轧制过程和电气传动装置的新方法时，按下式确定电能节约量 ΔW ，

$$\Delta W = [k(k_1 P_B + k_2 P_{\Gamma} + k_3 P_{\Pi}) + k_4 P_{B.M}] k_5 T, \quad (4)$$

式中: $k = T_x \Delta / T_x$ —表征主电气传动装置空转运动时间减少的系数; k_1, k_2, k_3 —相应为立式轧辊、卧式轧辊电气传动装置和变流机组电机的空转功率与它们额定功率的比值; k_4, k_5 —表征利用新控制方法后, 轧制周期持续时间缩短的系数和利用新控制方法的比重; $P_B, P_F, P_{B.M}, P_{II}$ ——相应为立式轧辊、卧式轧辊、辅助机械和变流机组电

机的电气传动装置装机容量, T —板坯初轧机的年运行时间。1978年在马格尼特戈尔斯克冶金联合企业的1150板坯初轧机上部分采用本新方法(即 $k_5 = 0.6$)控制轧制过程和主电气传动装置, 即节约电能77.5万度以上。

[刘家桢译自《Промышленная энергетика》, 1980, №1, 8—9刘文琳校]

空调设备的节能

Zander, Turba

目前空调设备上能量的利用还是不合理的, 有大量热能的排气就是未经利用而排放掉了。

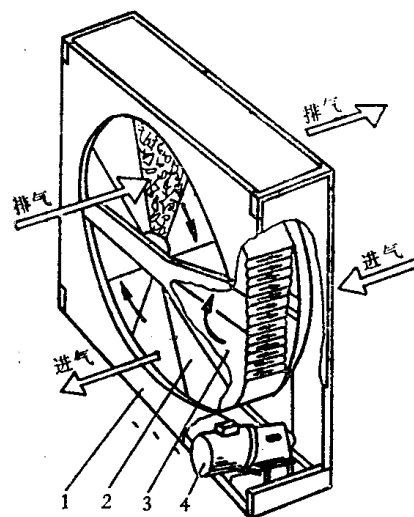
空调设备中排气和进气之间的热降(即焓降)利用就可发现节约燃料和降低投资成本设想的潜力。

除了装设热泵和再生系统以外, 利用再生式热交换器(见图)从排气中重新获得再生热能有很大的意义, 这是早在几年前就知道的通风和空调设备上最有效的方式。再生式热交换器由箱壳、转子、通道和传动部件组成。再生式热交换器中排气和进气的通道呈逆流布置, 同时, 在箱壳中两股气流通过转子的密封来隔开。再生式热交换器的核心由蓄热物质组成, 这些物质构成在转配合轴承座上转动的转子。蓄热物质是以特殊工艺生产的专用再生纸, 它有大量的小通道, 从而有较大的表面积积蓄和给出取自排气的能量。依靠马达的旋转, 蓄热物质交替承受两股气流的作用, 因此热能的传递是连续的, 并与温降相适应。转子用小功率马达带动, 转速约每分钟10次。

通过取道蓄热物质的气流的反向流动达到自清洁效果。若排气过脏, 则还可在转子前装设附加过滤器。

再生式热交换器可以根据空调技术设备的结构条件制成立式或卧式, 而且也可以多台设备并列运行。以转速的变化来控制转换能量的多少。

根据配置条件我们可以将热变换器分成普通的热交换器(RW)和再生焓交换器(RE)。在RW中得到的主要是热量, 这就是说转子的蓄热物质不



1—箱壳; 2—转子; 3—通道; 4—传动马达。

能约束空气的湿度。与此相反, 在相同的工况下RE中还传递了潜热和空气的湿度。

在空调设备中采用再生式能量交换器能获得排气(热的以及冷的)中所包含的很大一部份能量, 以供处理导入的空气, 从而达到明显降低成本的效果。这不仅反映在能量成本的下降, 同时也节约了运行费用, 而且甚至在小型的空调、采暖和冷却设备上也同样有节约效果。在通常的采暖设备上以此办法还可使其容量间接增大, 从而能降低投资费用。所增加的压力损失和驱动费用与节约的能量相比是微不足道的。采用热交换器能使采暖设备的额定功率减少到75%, 冷却设备的额定功率减少到50%。热能的年需要量降低到90%, 冷却的能量降低到15%。

低压电网中的大电动机启动

重庆大学 谢兴仪

摘 要

本文提出了直接启动的鉴定标准, 和计算启动电流及母线压降的简化电路。给出了两个例子。计算结果与试验结果很好相符。根据在 380 伏网络中大量的电动机启动试验, 作者认为大多数启动补偿器都是误用的, 可用一个简单的接触器代替。在不能直投的情况下, 建议选用液体起动器。

一、概 述

大家知道, 鼠笼型感应电动机的启动方法有全压启动(直投)和减压启动。前者电路简单可靠, 价格便宜, 应优先采用; 在启动条件不允许时, 应选用其它适当的启动方法。

过去, 由于电网容量小, 曾对电动机的直接投网加以限制。例如, 解放前接于公用电网的电动机在 5 马以上者不允许直投, 解放后曾把这种限额提高到 7 千瓦。随着工农业的发展, 电网容量不断扩大, 许多工厂都装设了自己的供电变压器, 在这种条件下

决定电动机能否直投, 我们曾照搬苏联电机学教材中的经验公式:

$$\frac{I_{\Pi}}{I_H} \leq \frac{3}{4} + \frac{\text{电源总容量}}{4 \times (\text{电动机容量})}。$$

这个经验太保守了, 上海电管局在 1960 年对此曾给出另一个比较先进但不完善的所谓 20% 和 30% 公式¹。因为给出这两套公式时都缺乏足够的理论和实验根据, 前者既较后者保守, 且出于大学中专教材, 为了“安全”, 以致在 60 年代和 70 年代的部分教材及设计手册中, 在大多数工厂选用启动电路时, 仍沿用苏联过时的经验公式, 这就给我国的社会

能量的转换不取决于排气和进气的绝对温度值, 能量的节约是由能降梯度的大小和通过的空气体积的大小给出的, 由此也可以推导出应用再生式能量交换器的经济必要性。

国营 Gotha 空气技术公司、国营空气和制冷技术联合企业在 Dráždansk 研究所和 Dresden 空气和制冷技术研究所共同研制工作的基础上, 今年已开始生产五种尺寸的 RW 和 RE 再生式能量交换

表 1

RW/RE 尺寸	空气流量[米 ³ /时]
1000	1000~5500
1250	2000~10000
1600	3000~15000
2000	5000~23000
2500	7000~35000

器(表1)。

同时在 RE 上不允许达到任何大的结露, 而在 RW 上可达到冰点。RE 可用到 80℃ 气流中, 而 RW 可用到 120℃ 气流中。

热交换器的试产品曾在各种工作条件下进行了试验, 并证实效果良好。它的用途是多方面的。可用在饭店和工作场所的空调、工厂车间的通风、大型干燥室和焙烧室的工艺过程。利用纤维素为基础(代替石棉)生产转子的蓄热物质可克服任何不利影响。

试验证明, 在遵守技术条件情况下, 采用再生式能量交换器对于节能和降低投资成本是一项有效而又合理的措施。

[宋汉武译自《Energetika》, 1979, 29, №9, 423—424 张裕庆校]

主义建设造成很大的损失。本文重点讨论低压电网中鼠笼型感应电动机直投时的起动电流及母线压降。结合大量试验数据充分证明,目前广泛使用的自耦减压起动器,绝大多数不但是不必要的,有时还是有害的。

二、选择直投电路应当考虑的问题

全压起动和直接投网似乎是同一概念,其实不然。全压起动指起动过程中加于电动机的电压为其额定值;直投则指电动机只用一个电阻可略的开关直接与电动机额定电压相当的电网接通,在起动过程中由于压降,电动机端电压一般与额定值不符。我们用“直投”代替“全压起动”正是考虑了这个实际。

电动机的起动电流与电网压降有着直接的关系。起动电流的非周期分量以时间常数

$$T_d = X_{Dq} / \omega r_{Dq}$$

按指数规律迅速衰减。式中 ω 为电源电压的角频率, $\omega = 2\pi \times 50 = 314$; X_{Dq} 为电动机起动时的电抗; r_{Dq} 为电动机起动时的电阻。一般, $X_{Dq}/r_{Dq} = 2-3$, $T_d = 6-10$ 毫秒,故非周期分量衰减很快,只在估计起动电流的动力效应及整定保护电器时才予以考虑。本文计算的是它的周期分量。从电动机的等值电路得知,在转速尚低时起动电流变化不大,与转子锁住时的电流几乎相等,我们计算的正是转子锁住电流,也正是它产生有实际意义的网络压降。

关于起动电流引起的网络压降的允许值,目前尚无统一规定,参考我国电器产品性能及水电部制定的供用电规则,建议电动机能直投的条件是:

(1).在供动力及照明的母线上电压降低到 $0.9 V_e$ (额定电压)以上。电压降得过低会使灯光闪烁及高压汞灯熄弧。

(2).专供动力而不考虑对照明的影响时,允许电压降到 $0.85 V_e$ 或更低,以不引起其他稍稍过载的电动机停车为限。

(3).无其它电动机在运行,只有这台电动机起动,允许电压降到不引起控制电器失

灵为限。

(4).在公用高压电网引起的压降不超过4%。

关于电动机本身,国内外制造厂都声明可以全电压起动。理论和实践都证明,减压起动比全压起动更易使电动机过热²。

三、直投时起动电流和网络电压的计算

计算用的简化电路如图1所示。可以看出,它与短路电流的计算电路颇相似。图中注明了计算电路各元件的名称和代表符号。实

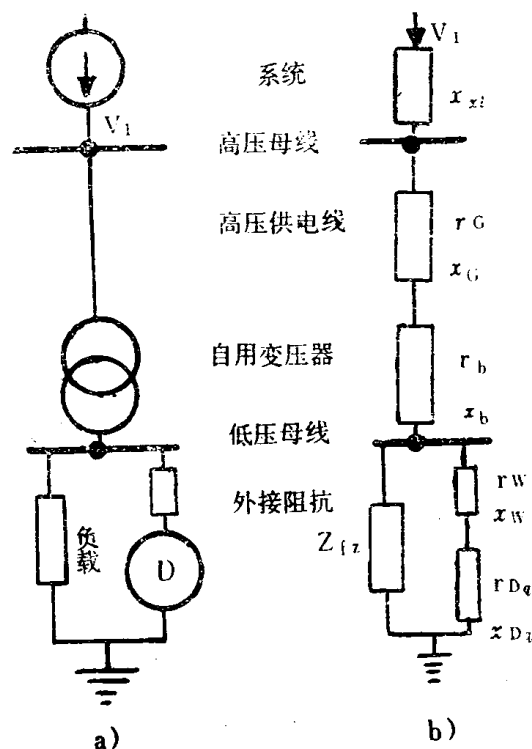


图1 简化计算电路

a) 实际电路 b) 等值电路

际上,系统的短路容量并非常数,高压供电线的阻抗也不易准确计算,且受线路负荷情况的影响。供电局提供的数据虽是一些粗略值,因为它们只占线路总阻抗的一小部分,故不太影响计算精度。自用变压器及待投电动机的阻抗对计算精度影响较大,一般选自手册或样本,这与实际有不小的容差,如果根据制造厂的试验数据选定,计算结果将更接近实际。用有名制计算,一般较易理解,为此需把变压器高低压侧的参数化至同侧后再进行计算。下面用两个实例来说明这个方法的应用。

例1 电机系电源间 75 千瓦电动机直投计算

系统 基准容量 $S_j = 100$ 兆伏安, 基准电压 $V_j = 10.5$ 千伏, 基准电抗 $X_j \approx Z_j = V_j^2 / S_j = 10.5^2 / 100 = 1.10$ 欧, 系统标么电抗 $X_{xt}^* = 0.712 - 0.896$ (标么单位), 系统电抗 $X_{xt} = X_j X_{xt}^* = 1.10 \times (0.712 - 0.896) = 0.7832 - 0.9856$ 欧。

10.5 千伏供电线 $r_G = 1.0164$ 欧, $X_G = 0.9126$ 欧。以上数据由重庆供电局提供。

变压器 SJ320-10.5/0.4 千伏, $Z_b^* = 0.045$, 短路损耗 $P_d = 6070$ 瓦 = 6.07 千瓦, 算得 $r_b^* = P_d / S_{ba} = 6.07 / 320 = 0.019$, $X_b^* = \sqrt{Z_b^{*2} - r_b^{*2}} = \sqrt{0.045^2 - 0.019^2} = 0.0408$, 额定阻抗 $z_{b3} = V_{be}^2 / S_{ba} = 10.5^2 / 320 = 0.3445$ 千欧 = 344.5 欧, $r_b = 0.019 \times 344.5 = 6.5455$ 欧, $x_b = 14.05$ 欧, $z_b = 15.5$ 欧。以上数据选自重庆电机厂变压器产品出厂文件 (标准值)。

电动机 A 91-4、75 千瓦, 220/380 伏, 239/138A。参考手册有: 起动电流倍数 $i_q = 5.5$, 起动时的 $\cos \varphi_q \approx 0.4$, $\sin \varphi_q = 0.92$, 额定阻抗 $Z_{De} = V_{De} / I_{De} = 220 / 138 = 1.5942$ 欧。起动阻抗 $z_{Dq}^* = 1 / i_q = 1 / 5.5 = 0.1818$, $z_{Dq} = 1.5942 \times 0.1818 = 0.2898$ 欧, $r_{Dq} = Z_{Dq} \cos \varphi_q = 0.2898 \times 0.4 = 0.116$ 欧, $X_{Dq} = Z_{Dq} \sin \varphi_q = 0.2898 \times 0.92 = 0.2666$ 欧。折算到变压器高压侧: 变压比 $k = 10.5 / 0.4 = 26.25$, $k^2 = 689$, $Z_{Dq} = 689 \times 0.2898 = 199.67$ 欧, $r_{Dq} = 689 \times 0.116 = 79.924$ 欧, $X_{Dq} = 689 \times 0.2666 = 183.7$ 欧。

总阻抗 $Z_Z = (1.02 + 6.5455 + 79.924) + j(0.784 + 0.9126 + 14.05 + 183.7) = 87.485 + j199.4 = 217.75 \angle 66.31^\circ$ 欧。

堵转电流 $= (400 \times 689) / (\sqrt{3} \times 217.75) = 730$ 安。

母线电压 $V = V_1 Z_{Dq} / Z_Z = 400 \times 199.67 / 217.75 = 400 \times 0.917 = 367$ 伏。

$$V / V_{De} = 367 / 380 = 0.965$$

紫外线记录的电压波显示, 电压从 $V_{p-p} = 22.7$ 毫米降到 20.8 毫米, 电压降低率 $V / V_1 = 20.8 / 22.7 = 0.916$; 电流波从 $I_{峰-峰} = 28.5$ 毫米降到 1.9 毫米 (相当于稳态电流 46 安), 算得起动电流周期分量为 690 安 (图 2)。电压的计算降低率为 0.917, 起动电流的周期分量为 730 安, 均与实测值很好相符。

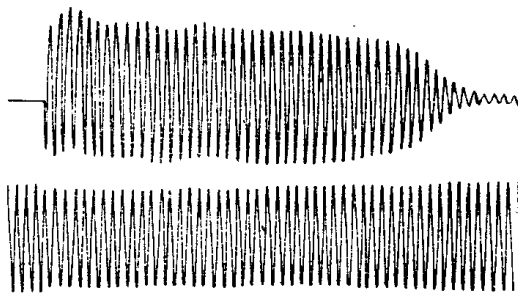


图 2 起动电流及母线电压波形

例2 红旗公社高滩岩一级电灌站 75 千瓦电动机直投计算

系统 $X_{xt}^* = 0.712 - 0.896$, $X_{xt} = 0.783 - 0.9856$ 欧。

10.5 千伏供电线 $r_G = 1.106$ 欧, $X_G = 1.566$ 欧。

变压器 SJ180-10.5/0.4 千伏, $Z_b^* = 0.045$, $r_b^* = 0.0228$, $X_b^* = 0.039$ 。化至变压器低压侧: $Z_{be} = 0.4^2 / 180 = 0.8889$ 欧, $Z_b = 0.04$ 欧, $r_b = 0.0203$ 欧, $X_b = 0.03467$ 欧。

380 伏低压供电线 LJ70 × 60 米, 几何均距 = 1 米。算得 $r_g = 0.0276$ 欧, $X_g = 0.0207$ 欧。化至 Z_{be} 表示的标么值: $r_g^* = 0.03105$, $X_g^* = 0.02329$ 。

电动机 两台 J093-2, 75 千瓦, 380/220 伏, 136/235A, $\eta = 90.6\%$, $\cos \varphi = 0.93$, 从设计手册查得和算出: $i_q = 6.5$, $r_q^* = 0.0324$, $X_q^* = 0.15$, $Z_q^* = 0.15385$, $\cos \varphi_q = 0.21$, $\sin \varphi_q = 0.975$, $Z_{De} = 220 / 136 = 1.61765$ 欧。

第一台电动机起动前, 电板上电压表指

示390伏；起动后运行于120安，电压表指示375伏，设其 $\cos\varphi_{fz} = 0.9$ ，则 $\sin\varphi_{fz} = 0.436$ 。忽略变压器前的阻抗。

$$\text{电机母线上压降 } \Delta V = \frac{120}{260} \left[(0.0228 + 0.03105) \times 0.9 + (0.039 + 0.02329) \times 0.436 \right] = 0.0347.$$

$$V = (1 - \Delta V) \times V_1 = (1 - 0.0347) \times 390 = 376.47 \text{ 伏}$$

$$\text{等效阻抗 } Z_{fz} = 375 / (\sqrt{3} \times 120) = 1.8043 \text{ 欧,}$$

$$r_{fz} = Z_{fz} \cos\varphi_{fz} = 1.8043 \times 0.9 = 1.624 \text{ 欧,}$$

$$X_{fz} = Z_{fz} \sin\varphi_{fz} = 1.8043 \times 0.436 = 0.7865 \text{ 欧.}$$

第二台电动机起动时包括第一台运行电动机的总阻抗

$$\begin{aligned} Z_Q &= \frac{1.8043 \angle 25.84^\circ \times 0.24888 \angle 77.877^\circ}{(1.624 + j0.7865) + (0.0524 + j0.24265)} \\ &= \frac{0.44905 \angle 103.72^\circ}{1.6764 + j1.02915} = 0.06986 + j0.2173 \\ &= 0.2283 \text{ 欧} \end{aligned}$$

$$\text{式中 } r_q = r_q^* Z_{De} = 0.0324 \times 1.61765$$

$$= 0.0524 \text{ 欧, } X_q = X_q^* Z_{De} = 0.24265 \text{ 欧, } Z_q = 0.24888 \text{ 欧.}$$

$$\begin{aligned} \text{总阻抗 } Z_z &= (0.0203 + 0.0276 + 0.06986) + j(0.03467 + 0.0207 + 0.21734) \\ &= 0.11776 + j0.2727 = 0.297 \text{ 欧.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{母线电压 } V &= V_1 Z_Q / Z_z = 390 \times 0.2283 / 0.297 = 390 \times 0.76856 = 300 \text{ 伏.} \end{aligned}$$

计算值：电压从375伏降到300伏，降低率 $= 300/375 = 0.80$ 。 $V/V_e = 300/380 = 0.79$ 。

实测值：紫外线录波， V_{P-P} 从24毫米降到19.5毫米，降低率 $= 19.5/24 = 0.81$ 。计算值与实测值十分吻合。

四、试验结果评述

我们还在其它地方做过许多试验，实测

数据与计算数据都能很好相符³，说明我们提出的计算方法是可靠的。可以预料，原始数据愈准确，计算结果就更接近实际。不过，为了实用目的，没有必要去追求过高的计算准确度。

在高滩岩一级站的试验说明，能够直投的电动机容量并不是变压器容量的20%和30%，这里已达到50%，且电源电压尚未达到额定值，第二台投网时并不影响第一台的正常运行。这里电压虽已降到 $0.79V_e$ ，因最大力矩比数是3.0，起动时的最大力矩降到 $0.79^2 \times 3 = 0.624 \times 3 = 1.87$ （标么单位），即使电压降得比 $0.79V_e$ 还低，也不致影响第一台电动机的正常运行。

接受试验的“大”型电动机原来都是用补偿器减压起动的。它们带动水泵，压缩机，或直流发电机负载，因此是在轻载情况下起动的。从低电压切换到全电压之间的断电时间不等，从0.05秒到0.12秒。在断电时间较短时，一般重合闸电流较小，但在断电时间较长时，重合闸电流曾多次出现较直投电流还大的冲击。这就是英美等国有些电力公司不允许使用我们现在那种起动补偿器的原因。图3示出了一相定子绕组在断电后由转子磁场感应出来的电压波和断电前加于这一绕组的电源电压波。这个波形图是假想的，只在电动机带动高力矩负载切换时才出现这种波形图。在A点开始断电。B点是两电压波反相且通过零的点（叫做反相零）。在这样的时刻重合闸相当于两台交流发电机的电压在

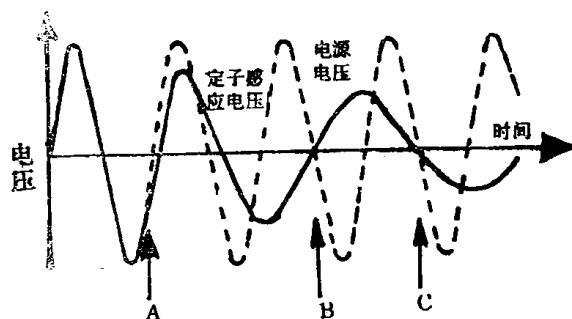


图3 电源电压和电动机电压的波形

直接反相时并车，合闸电流冲击较直投时更大。C点是两电压波同相且通过零的点(叫做同相零)，在这样的时刻重合闸冲击电流将最小，但不会为零。这是因为重合闸的电机与电源不同步，其电压也较电源电压低。我们现在使用的起动补偿器实际上是在AB之间乱投，幸好在起动过程中负载力矩不大，切换较快，造成损害的机率不多；如果真的带上它应该带的重载起动，切换又较慢，电动机和起动设备的损坏率将较直投的多得多。

例如在我们试验过的电动机中，空压机的起动阻力矩是较大的一类(约0.25标么单位)，因而比较容易出现现象图3那样的波形。我们有意造成类似反相零重合闸那样的事故状态，在QJ₂减压起动器允许的慢投速度下，从80%抽头切换到全电压。用SB-14型慢扫描示波器观察到切换电流峰值曾到 $I_p \approx 13.5$ (标么单位)，使空气开关跳闸。而直投数次，空气开关均未跳闸。后来换用紫外线录波，测知切换时间如在0.22秒左右，就要造成反相零重合闸的严重事故。

设 ω 为定子旋转磁场的电角速度，S为转差率，t为断电时间。近似地， $s = a + bt$ 。断电开始时 $t = 0$ ， $s = a$ 。b决定于起动过程中的阻力矩，阻力矩愈大，则b愈大。于是，断电后重合闸时，转子磁场在定子绕组中感应的电压与电源电压之间的相位移

$$\begin{aligned}\varphi &= \int_0^t \omega s(t) dt = \int_0^t \omega(a + bt) dt \\ &= \omega(at + \frac{b}{2}t^2)\end{aligned}$$

由此可见，如负载的阻力矩加倍，常数a与b都加倍，在相同的断电时间后重合闸，相位移 φ 将加倍。 φ 角随断电时间迅速增加，当负载力矩较大时增加尤其迅速。如前所述，在 $\varphi \approx \pi$ 时合闸给电机造成的危害将是很大的。

近几年来关于重合闸暂态电流的研究，由于发明了有检测装置的自动重合闸而得到新的发展。Z. Čeřovský用它重合闸8200千

瓦电动机(同相零时合闸)，冲击电流不超过2(标么单位)，而在最不利的情况下(反相零时)重合闸将是18(标么单位)。Lewis和Buckley在实验室撮得在最不利情况下重合闸，使试验电机终于受到机械破坏的暂态力矩波⁴，从而证实了重合闸暂态的破坏性。过去我们总说感应电动机结构坚实，经久耐用，可是有些电机没用多久就发现绕组绝缘破坏而被击穿。对于这种情况，我们不是归究于误用起动设备，而是完全归究于电机制造或其他原因。我们试验过的所有电机，除个别有特殊要求者外，计算和试验都表明可以直投。有的已改为直投，有的则建议在它们的补偿器损坏时甩掉不用，改为直投。在新选起动线路时，如按本文介绍的方法计算直投的电流及压降，对于正确选择起动电器及保护电器都有指导意义，从而可以大量节约投资。

对于单位变压器供电的电动机(变压器容量=电动机视在容量)，一般都可采用直投方案。电动机起动时的电压降落几乎全部降落在供电变压器上，而对高压电网影响甚小。选择变压器的容量与电动机的视在容量相等，起动时变压器虽然过载几倍，只要不是频繁起动，按GB1094-71是允许的。我们在高滩岩三级站进行的直投试验表明，在这种情况下起动，电动机端电压降低率达0.78，甚至更低，也就相当于减压起动了，没有必要另加起动限流设备。不过在这种情况下要采取措施，防止自动开关的合闸线圈电压低于其额定值的85%时不能可靠地吸合，发生触头跳动，烧坏触头。解决办法是设计70%额定电压能可靠吸合的线圈，或采用额定电压较低的线圈，起动后串接经济电阻或灯泡。

在不允许直投的情况下，必须限制起动电流。这时可采用串电阻起动，或串电抗起动。电阻器或电抗器可有两个阻值以适合不同起动力矩的要求。因为它们是不断电切换的，第二次电流冲击可以避免。液体电阻在起动之初处于冷态，阻值较大，限流作用较