

实用节能技术



杨振邦

山东科学技术出版社

前 言

我国的节能工作已有20多年的历史，在节约用电、锅炉改造、节油等方面都取得了一定的成绩，也积累了不少经验。而大规模地开展节能工作是随着近几年现代化建设的发展而迅速兴起的，需要指出的是，这一工作还刚刚开始，能源消费和能源利用不合理的现象还相当普遍，节能工作大有潜力，大有可为。

本书共分五章，在提高对节能工作重要性认识的基础上，介绍一些实用的节能技术，绝大多数是切实可行的，例如节约用电、提高工业窑炉和锅炉的热效率、利用余热等；能量的平衡对于从事能源管理者来说是十分必要的，电能平衡和热平衡就是从能量守恒的观点出发，全面地、综合地运用系统理论来评审能量的利用情况，从而找出提高能源利用率，实现用能最优化的方法；节能设备和材料也是实际节能工作中常遇到的问题，它们的选择和使用是否合理，也是直接关系到节能成效的。为实现能源的合理配置和能源的相互替代，本书还介绍了太阳能和风能的开发和利用情况，以便在某些常规能源短缺的场合，实现能源的替代，以满足经济和社会发展的需要。

本书在编写过程中，承蒙北京钢铁学院、山东工业大学、济南市节约能源办公室、济南铁合金厂、济南槐荫换热设备厂、济南市能源技术服务中心等单位的大力支持和帮

助，在此致以衷心地感谢。

本书初稿由李天宝、郭方、陈景林、王珊、李荣宾、王忠业、王关宏、方新华、丁守海等同志分别作了补充和修改，书中插图由杨子华、郭方同志绘制，在此也一并致谢。由于本人水平有限，书中缺点和错漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1990年5月

目 录

第一章 节电技术.....	1
第一节 变压器节电	1
第二节 电动机节电	43
第三节 照明节电	78
第四节 减少线路损耗	104
第五节 电网的无功补偿	112
第六节 送风机节电	124
第七节 水泵节电	154
第八节 空调机节电	172
第九节 电炉钢及硅铁节电	196
第十节 应用电子技术节电	217
第二章 热工节能技术	251
第一节 工业锅炉节能	251
第二节 工业窑炉节能	295
第三节 疏水器及其应用	318
第四节 废热回收节能技术	340
第五节 保温、绝热节能技术	346
第三章 能量守恒原理与节能	355
第一节 热平衡	355
第二节 电能平衡	379
第四章 节能设备与材料	392
第一节 节能机电产品	392
第二节 节能仪器、仪表	405

第三节 保温材料	414
第五章 太阳能、风能资源的开发与利用	421
第一节 太阳能资源及其利用	421
第二节 风能资源及其利用	429
第三节 太阳能和风能的特点	435

第一章 节电技术

第一节 变压器节电

一、从节电观点看变压器的特性

(一) 损失的种类: 变压器的损失包括: 与负荷电流无关, 大小不变的空载损失(铁损); 与负荷电流2次方成正比的负荷损失(铜损)。铜损的原因有负荷的不均、波动、不对称等; 铁损由磁滞损失(W_h)和涡流损失(W_e)组成。即

$$W_e = W_h + W_i = K_h f \cdot B_m^n + K_e f^2 \cdot B_m^2 (W) \quad (1-1)$$

式中: K_h 、 K_e 为常数; f 为电源频率(H_z); B_m 为铁心的最大磁通密度(W_b/m^2); n 为磁滞系数, 过去采用1.6, 近来因使用方向性硅钢片, 故采用2.5~3.5的值。

如设原边感应电势为 $E_1(V)$, 则

$$E_1 = K f B_m (V) \quad (1-2)$$

式中: K 为比例常数。

所以铁损变为

$$W_i = K_h \cdot f \cdot \left(\frac{E_1}{K \cdot f} \right)^n + K_e \cdot \left(\frac{E_1}{K} \right)^2 (W) \quad (1-3)$$

如果忽略掉阻抗压降, 则 E_1 与电源电压 V_1 相等, 所以电源电压不变, 铁损就不变。

铜损是原线圈和副线圈电阻损失之和, 三相时为

$$W_c = W_{c1} + W_{c2} = 3I_1^2 r_1 + 3I_2^2 r_2 = 3I_1^2 (r_1 + r_2')$$

$$= 3I_2^2 (r_1'' + r_2) \quad (\text{W}) \quad (1-4)$$

式中: I_1 为原边负荷电流(A); I_2 为副边负荷电流(A); r_1 , r_2 为原线圈和副线圈电阻(Ω); r_2' 为 r_2 换算成原边的换算值; r_1'' 为 r_1 换算成副边的换算值。

除了这些损失之外, 还有电介质损失和杂散损失, 但因测定困难且又微不足道, 所以忽略不计。

把额定负荷时的负荷损失 W_{CN} 与铁损之比叫做损失比,

$$\text{即} \quad \alpha = \frac{W_{CN}}{W_i} \quad (1-5)$$

损失比通常是 2 ~ 5。

(二) 效率: 变压器(三相)的常规效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + W_i + W_c} = \frac{\sqrt{3} V_2 I_2 \cos \theta}{\sqrt{3} V_2 I_2 \cos \theta + W_i + W_c} \times 100(\%)$$

$$(1-6)$$

式中: P_2 为副边输出功率(kW); V_2 为副边电压(V); I_2 为副边负荷电流(A); $\cos \theta$ 为功率因数。

若利用 (1-4) 式, 则 (1-6) 式变成:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{W_i}{P_2} + \frac{3I_2^2 (r_1'' + r_2)}{P_2}}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{W_i}{P_2} + \frac{(r_1'' + r_2) P_2}{V_2^2 \cos^2 \theta}} \quad (1-7)$$

若把 (1-7) 式看作是 P_2 的函数, 则:

$$Y = \frac{W_i}{P_2} + \frac{(r_1'' + r_2) P_2}{V_2^2 \cos^2 \theta} \quad (1-8)$$

最小的时候，效率最大。这个条件是 $\partial Y / \partial P_2 = 0$ 时，效率最大。

$$\frac{\partial Y}{\partial P_2} = -\frac{W_1}{P_2} + \frac{r_1'' + r_2}{V_2^2 \cos \theta} = 0 \quad (1-9)$$

这时输出功率是： $P_{2m} = V_2 \cos \theta \sqrt{\frac{W_i}{r_1'' + r_2}}$ ，铜损是：

$$W_{em} = 3I_2(r_1'' + r_2) = 3\left(\frac{P_{2m}}{\sqrt{3}V_2 \cos \theta}\right)^2 (r_1'' + r_2) = W_i \quad (1-10)$$

变成与铁损相等。即，效率最大时的输出功率，是铁损和铜损变成相等时的输出功率。

如用图表示效率对输出功率的变化，可以画成图 1-1。

变压器的效率既随输出功率变化而变化，同时也随负荷的功率因数的变化而变化。功率因数变坏，效率也就随之降低（图 1-2），这是由于变压器的容量是用 kVA 表示，而效率的计算是用 kW 的缘故。

如果设额定副边负荷电流为 I_{2N} ，效率最大时的负荷电流为 I_{2m} ，因为铜损与负荷电流的 2 次方成正比，所以有下面关系存在

$$\frac{I_{2m}}{I_{2N}} = \sqrt{\frac{W_{em}}{W_{GN}}} = \sqrt{\frac{W_i}{W_{GN}}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \quad (1-11)$$

如果损失比已知，则输出功率在百分之多少的地方效率变成最大就能知道（图 1-3）。

因为变压器负荷是时时刻刻不停地变化着，所以即使计算某一时刻的效率也是没有意义的，最好用每一天的效率来

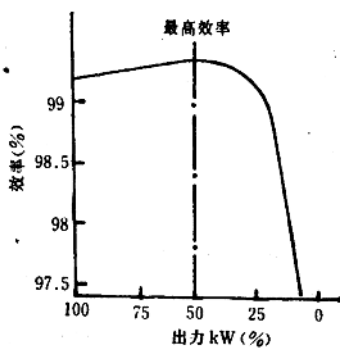


图 1—1 变压器的效率

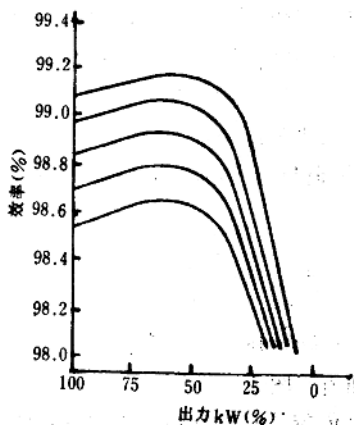


图 1—2 力率和效率的关系

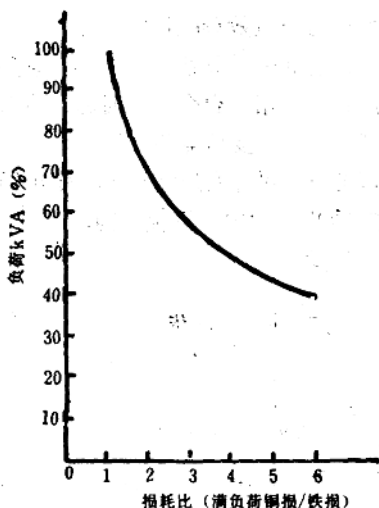


图 1—3 损耗比—效率为最大时的负荷率

计算。把用下式表示的效率叫全日效率。假若每天的负荷变化的曲线大体相同，如果认为全日效率变成最高那样的运行方式，则损失电量就变得最少。

$$\text{全日效率} = \frac{\text{1 天的输出电量(kWh)}}{\text{1 天的输出电量} + \text{1 天的损失电量}} \times 100\% \quad (1-12)$$

二、节电方法

(一) 停用轻载变压器：如果有多台变压器，在各变压器的负荷率都低的情况下，就要停用负荷率最低的变压器，

合并负荷的做法是能节电的。但是，依据条件不同，则有时增加了负荷的变压器所增加的损失还比停用的变压器的损失大，所以需要进行节电效果的计算。

例1—1 有500kVA变压器2台，每台变压器的负荷率都是40%，计算停用一台变压器时的节电效果（ N_{01} 变压器负荷率为40%， N_{02} 变压器为80%）。

在此种情况下， N_{01} 变压器和 N_{02} 变压器（两变压器满负荷铜耗为7.5kW）铁损、铜损均为：

$$\text{铁损} = 1.3 \text{ (kW)}$$

$$\text{铜损} = \text{满负荷铜损} \times (\text{负荷率})^2$$

$$= 7.5 \times \left(\frac{40}{100}\right)^2 = 1.2 \text{ (kW)}$$

$$\text{从而，总损失} = 2(1.3 + 1.2) = 5 \text{ (kW)}$$

$$N_{01}\text{变压器停用后，} N_{02}\text{变压器的铁损} = 1.3 \text{ (kW)}$$

$$N_{02}\text{变压器铜损} = \text{满负荷铜损} \times (\text{负荷率})^2$$

$$= 7.5 \times \left(\frac{80}{100}\right)^2 = 4.8 \text{ (kW)}$$

$$\text{总损失} = 1.3 + 4.8 = 6.1 \text{ (kW)}$$

此时，停用一台变压器的做法反而使损失增加。

（二）调换变压器：有备用变压器时，比起使用小容量变压器以接近满负荷运行来，还是使用大容量变压器低负荷运行的做法会使损失变小。

例1—2 把500kVA变压器换成1000kVA。

现实情况是500kVA变压器以90%负荷运行，内阻、电流均取一般值。

$$\text{铁损} = 2.7 \text{ (kW)}$$

$$\text{铜损} = 7.0 \times 0.9^2 = 5.67 \text{ (kW)}$$

$$\text{总损失} = 2.7 + 5.67 = 8.37 \text{ (kW)}$$

换成1000kVA变压器时，由于负荷率变成45%，所以

$$\text{铁损} = 3.5 \text{ (kW)}$$

$$\text{铜损} = 14.8 \times 0.45^2 = 3 \text{ (kW)}$$

$$\text{总损失} = 6.5 \text{ (kW)}$$

(三) 夜间、假日停用变压器：在夜间或假日不生产的设备或车间等，把夜间、假日都不能停电的负荷集中于某一台变压器里，装设夜间专用变压器。由于在夜间、假日里停用变压器，能够求得节电。但白天和夜间用电相差不太多时，就没有效果。

(四) 控制变压器的台数：在几台变压器并联运行时，由于按照负荷大小增减运行的台数，所以能减少总的损失。在电源设备里，在变压器并联运行时，一般采用容量和特性相同的变压器，此时各台变压器所分担的负荷也相同。现在有 N 台变压器并联运行，其总损失 $W_N(W)$ 是：

$$W_N = NW_i + NW_{CN} \left(\frac{P_L}{P \cdot N} \right)^2 (W) \quad (1-13)$$

式中： $P(kVA)$ 为变压器的容量； $P_L(kVA)$ 为总负荷。使运行台数变成 $(N-1)$ 台时的损失 $W_{N-1}(W)$ 是：

$$W_{N-1} = (N-1)W_i + (N-1)W_{CN} \left[\frac{P_L}{P \cdot (N-1)} \right]^2 (W) \quad (1-14)$$

减少运行台数这种做法，能使损失减少的条件是， $W_{N-1} < W_N$ ，所以

$$NW_i + NW_{CN} \left(\frac{P_L}{P \cdot N} \right)^2 > (N-1)W_i + (N-1)W_{CN} \left[\frac{P_L}{P \cdot (N-1)} \right]^2 \quad (1-15)$$

如果改写，则 $\frac{P_L}{P} < \sqrt{\frac{W_i N(N-1)}{W_{CN}}}$ ，即

$$\frac{P_L}{P} < \sqrt{\frac{N(N-1)}{\alpha}}$$

例如，损失比 $\alpha = 3$ ，3台变压器并联运行时， $\sqrt{N(N-1)/\alpha} = \sqrt{3 \times 2/3} = 1.44$ ，总负荷在变压器容量（1台）的141%以下时，2台并联运行的做法能使损失减少的情况见表1—1。

表1—1 多台变压器并联运行时（同容量、同特性）
为得到最小损失的变压器台数

临界负荷 (%)	损失比	$\alpha = 2$		$\alpha = 3$		$\alpha = 4$		$\alpha = 5$	
		变压器数 (台)							
		2	3	2	3	2	3	2	3
2台和1台		100	100	81	81	70	70	63	63
3台和2台			173		141		122		109

例1—3 损失比为3的变压器（同容量）3台并联运

行时，总负荷在变压器容量（1台）的141%以下时，使2台并联运行，损失最小；又总负荷在81%以下时，使1台单独运行，损失最小。

（五）多台变压器并联运行：变压器并联运行的条件是：电压等级和接线组别相同；变比差值不超过 $\pm 0.5\%$ ；短路电压值不超过 $\pm 10\%$ ；2台变压器容量之比不超过3:1。

这里说的变压器并联运行不仅仅是指同一变电站内的变压器，对于相邻的几台变压器，只要各台变压器负载不均，就可以并联运行。在符合并联运行的条件下，第一种情况是容量、性能完全相同。如2台变压器并联运行时空载损失为单台运行时之和（即为单台运行时的2倍），则短路损失由2台变压器平均负担（即为单台运行时的一半）。这时画出1台变压器单独运行与2台并联运行时在各种负载率下的功率损失曲线，两条曲线的交点即并联运行的经济分界点，对应于该点的负载为临界负载，在此负载以下，单台运行损失小；在此负载以上时，并联运行损失小。多台变压器并联运行时类推。当 n 台容量、性能相同的变压器并联运行时，经济分界点对应的负载率为：

$$\beta_n = \sqrt{\frac{n(n-1)\Delta P_0}{\Delta P_K}} \quad (1-16)$$

式中： ΔP_0 为空载损失； ΔP_K 为短路损失。

当负载率大于 β_n 时，应投入第 n 台变压器。例如，某变电站有3台SJ-3200/10型变压器，已知 $\Delta P_0=11\text{kW}$ ， $\Delta P_K=37\text{kW}$ ，一次额定电流为185A，求投入第二台及第三台变压器时的负载率 β_2 、 β_3 及一次负载电流。

$$\beta_2 = \sqrt{\frac{2 \times (2-1) \times 11}{37}} = 0.77$$

这时的一次电流 $= 0.77 \times 185 = 142.45 \text{ (A)}$

即当负载率为0.77或一次电流为142.45A时应投入第二台变压器。

$$\text{同理, } \beta_3 = \sqrt{\frac{3 \times (3-1) \times 11}{37}} = 1.335$$

一次电流为 $1.335 \times 185 = 247 \text{ (A)}$ ，此时应投入第三台变压器。

第二种情况，即2台容量、性能不同的变压器的并联运行。这时要根据每一台变压器的损失曲线及并联后的损失曲线，得出并联后的经济分界点及对应的负载率。据此，确定在多大负载时，投入变压器的顺序。

变压器并联运行后，不但能降低配变电的损失，同时也能降低低压线路的损失。

(六) 加强变压器冷却，提高带负荷能力：变压器运行时，其温度的增高要影响带负荷的能力。因此，加强冷却，使变压器的容量充分发挥，这就相当于减少了有功功率和无功功率的损失。例如电炉炼钢或矿热炉等用的变压器，要求有较强的过负荷能力，以适应生产过程中断续的过负荷要求，而不必加大变压器的容量。一般采取风冷、水冷、强迫油循环等方法，以提高变压器带负荷的能力。

(七) 提高变压器负载的功率因数：变压器的效率随着负载功率因数的变化而变化，当功率因数 $\cos\phi = 1$ 时，效率最高。特别是容量较大的变压器，如果功率因数太低，会使电网的无功功率造成很大的浪费，因而要采用调相机或装电

容器等方法加以补偿。如果变压器负载的功率因数都比较高，整个电网的无功功率损失就会大大降低。

(八) 采用“变容量变压器”：对于变压器经常处于轻载和空载的用电单位，采用“变容量变压器”是降低功率损失的好办法。

所谓变容量变压器，是将通常的变压器原、副线圈各分成两段，每段都保持原来的匝数，导线面积减少一半。当两段线圈并联时，有效匝数等于原匝数，导线面积等于原面积，允许通过电流为原电流；当两段线圈串联时，有效匝数等于原匝数的2倍，导线面积为原面积的一半，允许电流为原电流的一半。这样就实现了变压器容量的调整，在需用负荷较大的时候，变压器线圈并联；在负荷较小的时候，把变压器线圈改为串联。

(九) 单台变压器容量的选择方法：

1. 基本概念：

(1) 变压器对应于实际负荷和实际功率因数的工作效率，称为变压器的运行效率。

(2) 对同一台变压器而言，在负荷功率因数一定的情况下，当变压器的负荷率为某一值时，其运行效率最高。该运行效率称为变压器对应于某功率因数的最高效率。负荷的功率因数一定，变压器的最高效率也一定。对应于不同的功率因数，同一台变压器的最高效率也是不同的。

(3) 对应于同一负载，往往可选择几种不同容量的变压器供电。变压器不同，变压器的负荷率也不同，变压器的运行效率也将不同。

2. 选择原则：选择变压器的容量，要针对实际负荷在多

种规格的变压器中选择运行效率最高者，选择的基本方法是比较和实验（表 1—2～表 1—4）。

3. 选择方法:

(1) 根据负荷的大小和功率因数，挑选出多种规格的变压器作为待选变压器。各待选变压器的额定容量均应大于负荷的表观功率。

(2) 计算各待选变压器对应于某一负荷的负荷率。

(3) 根据各待选变压器的额定容量和负载率，由表 1—2～表 1—4 查出各待选变压器的运行效率。如果某种规格的变压器对应于某负荷的负荷率与表中数值不同，可利用插值法求出相应的运行效率。

(4) 将各台待选变压器的运行效率进行比较，选择运行效率最高者。

例 1—4 某负荷的有功功率为 $P_2=272\text{kW}$ ，功率因数为 $\cos\phi=0.85$ ，试选变压器的合理容量。

根据题意，表观负荷 $S_2 = \frac{P_2}{\cos\phi} = 320 \text{ (kVA)}$ ，若选用 SJ 型变压器，按负荷能力应以变压器的额定容量 $S_n=420$ 、560、750、1000 (kVA) 的变压器作为待选变压器。上述各待选变压器对应于负荷 S_2 的负荷率 (β) 和运行效率 (η) 由表 1—3 查出为：

$S_n(\text{kVA})$	420	560	750	1000
β	1	0.75	0.56	0.56
η	0.9776	0.9779	0.983	0.980

从以上数据可看出，750kVA 的变压器运行效率最高，故选用 SJ₇750/10 型 750kVA 变压器。