

关于水电站方案比較中容量及电量
的可比条件問題

徐寿波 楊志荣

中国科学院綜合考察委员会

綜合动能研究室

1963年 北京

关于水、火、电方案比较中容量及电量 的可比条件问题

一、前言：

在动力系统的电源规划设计中要进行水、火、电方案选择的技术经济计算，以决定水、火、电开发的经济合理性。方案比较的基础是参加比较的若干个水、火、电开发方案具有可比条件。这些可比条件是：1、在功能效益上的可比（包括容量和电量的效益），2、在国民经济总费用上的可比，3、在投入资金和发挥效益时间上的可比，4、在采用价格指标上的可比。使各个方案具有上述这些条件是技术经济计算很重要的任务。本文就水、火、电方案比较中的容量及电量可比条件问题进行探讨。因为这个问题一直还没有进行很好的研究，同时在实际工作中也没有引起人们的足够注意。

在现在实际规划设计中，水、火、电的方案比较通常以相同的装机容量和发电量为基础。这样，实际上就使水、火、电没有具有容量和电量的可比条件，因而就会影响最佳方案的选择。在某些情况下，可能使方案优劣倒置，得出不正确的结果。本文的研究目的是为水、火、电的方案比较找出容量及电量的真正可比条件；这对动力系统中电源选择和动力系统合理结构的规划设计都有重要的实际意义。

在本文计算中，采用了水电部电力系统设计院的资料以及水电部有关的多年度实际统计资料。

二、影响水、火、电容量及电量可比的因素以及容量和电量可比性确定的方法。

电厂的工作容量和电量除满足电力系统的有效负荷以外，还有一部分消耗在厂用电和输电线路的损失上。我们知道，水

电厂的厂用电一般很少，它们主要用在发电机励磁，油泵，照明及通风设备等。而火电厂厂用电则比水电厂厂用电要大很多，因为除上述厂用电以外，还有锅炉给水，循环水，燃料运输和磨碎以及机械除灰除尘等要消耗很多的电力。水电厂由于受水力资源的限制往往离负荷中心较远，输电距离较长，所以输电损失大，而火电站一般可以配置在负荷中心或离其不太远的地方，所以输电损失较小。

另外，为了保证动力系统中水火电站的正常工作，除工作容量以外还必须配置一定容量的备用容量，而备用容量的多少则和电站种类有很大关系。对事故备用来说，由于水电站的设备比较简单，技术装备水平比较高，事故次数少，同时水电站事故检修的时间一般也较短并且投入运行快，因而水电站的事故率要比火电厂的事故率低。所以水电站每台装机容量所需要事故备用容量就比火电站少。对检修备用来说，由于水电厂机组检修时间比火电厂机组检修时间要短，所以水电厂每台装机容量所需要的检修备用就比火电厂少。

综上所述，影响水火电站容量及电容量可比的因素，主要有下列三个：厂用电，输电损失和事故，检修备用。

必须指出，厂用电及输电损失对水火电方案的容量和电容量可比条件都有影响，而备用仅对容量可比条件有影响。

现在我们来讨论在水火电站方案比较中容量及电容量可比条件的确定问题。我们知道为了满足一定的电力负荷（容量）的要求 P ，那么电站设备的装置容量必须大于 P 。我们假设 P_K 及 P_T 来表示火电站和水电站的装置容量，那么它们可用下列公式求得：

对于火电站：

$$P_K = P_K \cdot p_{as} + P_K \cdot p_{ez} = P + P_K \cdot ch + P_K \cdot \lambda m$$

$$+P_{K.ap}+P_{K.pp}+P_{K.HP} \\ =\alpha_K P. \quad (1)$$

对于水电站：

$$P_{\Gamma} = P_{\Gamma.pas} + P_{\Gamma.pas} = P + P_{\Gamma.CH} + P_{\Gamma.\Delta n} \\ + P_{\Gamma.ap} + P_{\Gamma.pp} + P_{\Gamma.HP} \\ =\alpha_{\Gamma} P. \quad (2)$$

式中： $P_{K.pas}, P_{\Gamma.pas}; P_{K.pes}, P_{\Gamma.pes}$ ——火电站和水电站的工作容量及备用容量。

$P_{K.CH}, P_{\Gamma.CH}; P_{K.\Delta n}, P_{\Gamma.\Delta n}$ ——火电站和水电站的厂用容量及输电线损失容量。

$P_{K.ap}, P_{\Gamma.ap}; P_{K.pp}, P_{\Gamma.pp}; P_{K.HP}, P_{\Gamma.HP}$ ——火电站和水电站的事故备用容量、检修备用容量及负荷备用容量。

下面我们叙述公式(1)、(2)中每一组成部分的计称：首先我们来计称水、火电站的厂用电，根据分析的结果，厂用电容量可以用下列公式来计称：

对于火电站：

$$P_{K.CH} = \frac{\lambda_K}{1-\lambda_K} (P + P_{K.\Delta n}) \quad (3)$$

对于水电站：

$$P_{\Gamma.CH} = \frac{\lambda_{\Gamma}}{1-\lambda_{\Gamma}} (P + P_{\Gamma.\Delta n}) \quad (4)$$

式中： $\lambda_K, \lambda_{\Gamma}$ ——火电站和水电站厂用电容量与工作容量之比。

由公式(3)、(4)可知，水火电站的厂用电容量和厂用电率有效负荷、输电线损失容量等因素相关。

水火电站的输电损失容量可以由下列公式求得：

电 — 4 —

对于火电站:

$$\begin{aligned} P_K \cdot \Delta \eta &= \frac{r_K}{U_K^2} \cdot l_K \cdot (P^2 + Q^2) + 2 \Delta P_T \\ &= \frac{r_K}{U_K^2} \cdot l_K \cdot (1 + \tan^2 \varphi) \cdot P^2 + 2 \Delta P_T \\ &= \frac{r_K}{U_K^2} l_K \cdot \cos^2 \varphi \cdot P^2 + 2(1 - \eta_T)P. \quad (5) \end{aligned}$$

对于水电站:

$$P_r \cdot \Delta \eta = \frac{r_r}{U_r^2} l_r \cdot \cos^2 \varphi \cdot P^2 + 2(1 - \eta_r)P. \quad (6)$$

由公式 (5), (6) 可知, 水火电站的输电线容量损失和输送容量 P 、距离 l 、导线电阻 r 、功率因数 $\cos \varphi$ 成正比, 而与输电电压 U 和变压器效率 η_T 成反比, 一般输送距离远, 输电损失大, 而输电电压高则在其它情况不变下输电损失越小。

水火电站的总备用容量可以用下式求得:

对于火电站:

$$\begin{aligned} P_{\text{reg}} &= \beta_K \cdot P \cdot P_K \cdot \rho_{\Delta S} = P_K \cdot \alpha_P + P_K \cdot \rho_P + P_K \cdot H_P \\ &= (\beta_K \cdot \alpha_P + \beta_K \cdot \rho_P + \beta_K \cdot H_P) \\ &= (P + P_K \cdot CH + P_K \cdot \Delta \eta) \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

对于水电站:

$$\begin{aligned} P_r \cdot \rho_{\Delta S} &= \beta_r \cdot P \cdot P_r \cdot \rho_{\Delta S} = P_r \cdot \alpha_P + P_r \cdot \rho_P + P_r \cdot H_P \\ &= (\beta_r \cdot \alpha_P + \beta_r \cdot \rho_P + \beta_r \cdot H_P) \\ &= (P + P_r \cdot CH + P_r \cdot \Delta \eta) \quad (8) \end{aligned}$$

式中: $\beta_K \cdot \alpha_P, \beta_r \cdot \alpha_P; \beta_K \cdot \rho_P, \beta_r \cdot \rho_P; \beta_K \cdot H_P, \beta_r \cdot H_P$ — 火电站和水电站的事备用、检修备用和负荷备用的容量系数。

将式 (3) (5) (7) 和式 (4) (6) (8) 分别代入式 (1) 和式

(2), 即可求得下列公式:

对于火电站:

$$\begin{aligned}
 P_K &= \left(1 + \frac{\lambda_K}{1 - \lambda_K}\right) \times \left\{1 + \frac{r_K}{U_K^2} l_K \cdot \cos^2 \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_T)\right\} \\
 &\quad \times (1 + \beta_K \cdot p) \times p \\
 &= \left(1 + \frac{\lambda_K}{1 - \lambda_K}\right) \times \left\{1 + \frac{r_K}{U_K^2} l_K \cdot \cos^2 \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_T)\right\} \\
 &\quad \times (1 + \beta_K \cdot a_p + \beta_K \cdot p_p + \beta_K \cdot H_p) \times p \quad (9)
 \end{aligned}$$

对于水电站:

$$\begin{aligned}
 P_T &= \left(1 + \frac{\lambda_T}{1 - \lambda_T}\right) \times \left\{1 + \frac{r_T}{U_T^2} \cdot l_T \cdot \cos^2 \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_T)\right\} \\
 &\quad \times (1 + \beta_T \cdot a_p + \beta_T \cdot p_p + \beta_T \cdot H_p) \times p \quad (10)
 \end{aligned}$$

用式(9)和式(10)相除, 我们就可获滴水火电站的容量可比像数 k^N :

$$\begin{aligned}
 k^N = \frac{P_K}{P_T} &= \frac{\left(1 + \frac{\lambda_K}{1 - \lambda_K}\right) \times \left\{1 + \frac{r_K}{U_K^2} \cdot l_K \cdot \cos^2 \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_T)\right\} \times (1 + \beta_K \cdot a_p + \beta_K \cdot p_p + \beta_K \cdot H_p)}{\left(1 + \frac{\lambda_T}{1 - \lambda_T}\right) \times \left\{1 + \frac{r_T}{U_T^2} \cdot l_T \cdot \cos^2 \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_T)\right\} \times (1 + \beta_T \cdot a_p + \beta_T \cdot p_p + \beta_T \cdot H_p)} \\
 &= k_{CH}^N \cdot k_{lzn}^N \cdot k_{reg}^N \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\text{式中: } k_{CH}^N = \frac{1 + \frac{\lambda_K}{1 - \lambda_K}}{1 + \frac{\lambda_T}{1 - \lambda_T}} \quad \text{厂用电容量可比像数。} \quad (11-1)$$

$$k_{lzn}^N = \frac{1 + \frac{r_K}{U_K^2} \cdot l_K \cdot \cos^2 \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_T)}{1 + \frac{r_T}{U_T^2} \cdot l_T \cdot \cos^2 \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_T)} \quad \text{输电损失容量可比像数。} \quad (11-2)$$

$$k_{\text{reg}}^{\text{IV}} = \frac{1 + \beta_K \cdot a_p + \beta_K \cdot p_p + \beta_K \cdot H_p}{1 + \beta_r \cdot a_p + \beta_r \cdot p_p + \beta_r \cdot H_p} \quad \text{—— 备用容量可比系数} \quad (11-3)$$

下面我们来讨论水火电站电量可比系数的确定问题。我们知道水火电站为了供给动力系统用户一定数量的电能，所以水火电站实际发出的电能 γ_K , γ_r 则必须大于 γ ，因为电站本身需要消耗一部分厂用电 $\gamma_K \cdot CH$, $\gamma_r \cdot CH$ 以及输电线需多消耗一部分线路损失 $\gamma_K \cdot \Delta m$, $\gamma_r \cdot \Delta m$ 。我们用下式来求水火电站实际需要发出的电能 γ_K , γ_r ：

$$\gamma_K = \gamma + \gamma_K \cdot CH + \gamma_K \cdot \Delta m = \gamma_K \gamma \quad (12)$$

$$\gamma_r = \gamma + \gamma_r \cdot CH + \gamma_r \cdot \Delta m = \gamma_r \gamma \quad (13)$$

我们知道式(12)(13)中厂用电及输电损失电量可以用下列公式求得：

对于火电站：

$$\gamma_K \cdot CH = \frac{\lambda_K}{1 - \lambda_K} (\gamma + \gamma_K \cdot \Delta m) \quad (14)$$

$$\gamma_K \cdot \Delta m = \left[\frac{\gamma_K}{U_K^2} l_K \cdot \cos^2 \varphi p^2 + 2(1 - \eta_T) p \right] T \quad (15)$$

对于水电站：

$$\gamma_r \cdot CH = \frac{\lambda_r}{1 - \lambda_r} (\gamma + \gamma_r \cdot \Delta m) \quad (16)$$

$$\gamma_r \cdot \Delta m = \left[\frac{\gamma_r}{U_r^2} l_r \cdot \cos^2 \varphi p^2 + 2(1 - \eta_r) p \right] T \quad (17)$$

式中： $\gamma = P \cdot T$ T ——电力负荷年利用小时数

将式(14)(15)和式(16)(17)分别代入式(12)及式(13)，即可得下式：

$$T_K = \left(1 + \frac{\lambda_K}{1 - \lambda_K}\right) \left\{ 1 + \frac{r_K}{U_K^2} l_K \cos^{-2} \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_T) \right\} p \cdot T \quad (18)$$

$$T_r = \left(1 + \frac{\lambda_r}{1 - \lambda_r}\right) \left\{ 1 + \frac{r_r}{U_r^2} l_r \cos^{-2} \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_r) \right\} p \cdot T \quad (19)$$

将式(18)和式(19)相除, 我们就可获得水火电站的电量可比像数 k^T :

$$\begin{aligned} k^T = \frac{T_K}{T_r} &= \frac{\left(1 + \frac{\lambda_K}{1 - \lambda_K}\right) \left\{ 1 + \frac{r_K}{U_K^2} l_K \cos^{-2} \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_T) \right\}}{\left(1 + \frac{\lambda_r}{1 - \lambda_r}\right) \left\{ 1 + \frac{r_r}{U_r^2} l_r \cos^{-2} \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_r) \right\}} \\ &= k_{CH}^T \cdot k_{lin}^T. \end{aligned} \quad (20)$$

$$\text{式中: } k_{CH}^T = \frac{1 + \frac{\lambda_K}{1 - \lambda_K}}{1 + \frac{\lambda_r}{1 - \lambda_r}} \quad \text{厂用电电量可比像数} \quad (20-1)$$

$$k_{lin}^T = \frac{1 + \frac{r_K}{U_K^2} l_K \cos^{-2} \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_T)}{1 + \frac{r_r}{U_r^2} l_r \cos^{-2} \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_r)} \quad \begin{array}{l} \text{输电线} \\ \text{电量损} \\ \text{失可比} \\ \text{像数} \end{array} \quad (20-2)$$

根据上面公式求得的容量和电量的可比像数, 我们就可以求得在满足动力系统相同的电力负荷(容量及电量)的情况下, 火电站实际需要的设备容量和发电量与水电站实际需要的设备容量和发电量的比值关系。我们知道, 为了水火电方案在容量和电量方面的可比起见, 在水火电方案比较计标中(包括投资

及年运行费用的计称) 应该以水火电站的实际需要设备容量和发电量为基础。这也就是说在计称中应该引用水火电站容量和电量的可比像数。

下面我们来讨论水火电站容量及电量可比像数的具体计称问题。

三、水火电容量及电量可比像数的计称及其函数值：

α) 厂用电容量及电量可比像数的计称：根据我国水火电站多年运行统计的实际资料，我国水电站的厂用电(入 r)数值值大都在 0.17% 左右，虽然它和水电站容量的大小，承担电力负荷的方式等因素有关，但变化很小，所以在规划设计计称中入 r 一般可采用 0.17% 数值。火电站厂用电的数值和电厂容量、机组型式、参数、燃料种类等有关，我国火电站厂用电的数值，根据实际资料，平均在 7-7.5% 左右，一般高压高温设备、烘热机组设备的火电站厂用电的数值比低温低压设备、冷凝机组设备的火电站要大。考虑到我国今后大容量高参数设备比重的增加，在计称中入 K 可采取 7.5%。

根据公式(11-1)及公式(20-1)即可计称厂用电容量及电量的可比像数 $K_{CH}^N = K_{CH}^T = 1.081$ 。

β) 输电线容量及电量损失可比像数的计称：

由公式(11-2)及(20-2)可知，输电线容量及电量损失可比像数和水电站输电线的长度， l_K, l_T ，输送容量 P ，输送电压 U ，输电线的导线电阻， r_K, r_T ，变压器的效率 η 以及功率因数 $\cos\varphi$ 等有关。根据分析的结果，最主要的可变因素只有两个，即输电线的长度和输送容量的大小。我们知道，在已知一定的输送距离和输送容量的条件下，可以找到最经济的输送电压，输电线导线截面电阻和变压器效率等。

所以式(11-2)和(20-2)可改写成下式：

$$k_{12m}^N = k_{12m}^7 = \frac{1 + \frac{Y_K}{U_K^2} l_K \cos^{-2} \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_T)}{1 + \frac{Y_F}{U_F^2} l_F \cos^{-2} \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_F)} = f(p, l)$$

我们知道，当火电站配置在负荷中心，不需要长距离输电线的时期，那么输电线线路损失则可忽略不计，在这种情况下，输电线容量及电量损失的可比像数可用下式求得：

$$k_{12m}^N = k_{12m}^7 = \frac{1 + 2(1 - \eta_T)}{1 + \frac{Y_F}{U_F^2} l_F \cos^{-2} \varphi \cdot p + 2(1 - \eta_F)} = f(p, l) \quad (21)$$

根据公式(21)，在卷一上作出了输电线容量及电量损失可比像数与输送容量和输电线长度关系的函数图。在计算中采用最大负荷功率因数为 $\cos \varphi = 0.95$ 。由卷一可以根据不同输送容量和距离，很容易求得输电线容量及电量损失的可比像数。

假使火电站的输电线损失不能忽略不计时，那么可以利用卷一并按下式进行求算：

$$k_{12m}^N = k_{12m}^7 = \frac{k_{F, 12m}^{N, 7}}{k_{K, 12m}^{N, 7}} \quad (22)$$

式中， $k_{F, 12m}^{N, 7}$ 、 $k_{K, 12m}^{N, 7}$ ——按水电站和火电站的输送容量和输电距离在卷一上所求得的水电站和火电站输电损失（包括容量及电量）可比像数。

现在对输电损失可比像数函数说明下列几点：

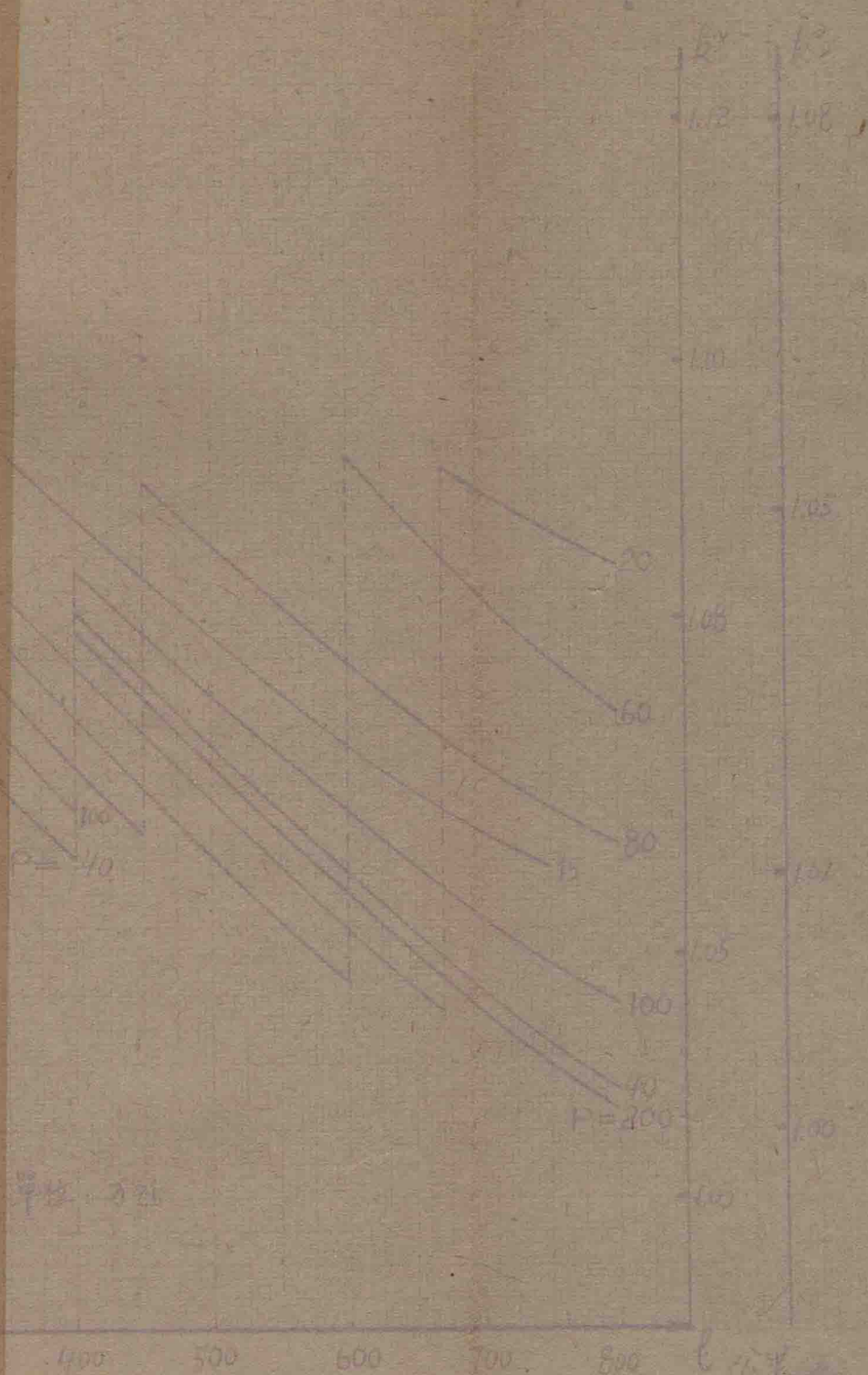
2. 输电损失可比像数曲线对每一输送容量随着输送距离的变化是不连续的，当中有几个“跳跃”这是因为当输电距离增长到一定数值时，受经济合理的输电电压就要提高一级。但对同一级电压来说，则随输电距离的增长，输电损失可比像数就逐渐减小。例如输送容量20万吨，在输电距离800公里之内有三级电压：在220公里以内，输电电压为220千伏， $\lambda_{17m}^{N.7}$ 数值在100公里时为0.9730，而当200公里时则为0.9535，大于220公里，输电电压则为330千伏， $\lambda_{17m}^{N.7}$ 数值在250公里时为0.9745，在500公里时为0.9495，超过670公里，输电电压则为400千伏， $\lambda_{17m}^{N.7}$ 数值在700公里时为0.9720，在800公里时为0.9670。

由上可知，当输电距离和输电电压相同时，输送容量越大，输电损失可比像数数值越小。

2. 当火电站离负荷中心较近，火电站输电损失可以忽略不计时，输电损失可比像数永远小于1。最低不小于0.92，一般都在0.96左右。而当计及火电站的输电损失时，输电损失可比像数可能小于1，也可能大于1。大于1的情形可能发生在下列二种情况，第一种情况是火电站的输电距离比水电站的输电距离要大，即 $l_k > l_r$ ，第二种情况是火电站的输电距离虽比水电站小，但由于电压等级的关系，火电站的输电损失反比水电站要大，例如输送容量20万吨，水电站的输电距离为350公里，相应的输电电压为330千伏，火电站的输电距离为200公里，相应的输电电压为220千伏，根据查1及公式(22)即可求得 $\lambda_{17m}^{N.7} = 1.01$ 。

6) 备用容量可比像数内计称：

由公式(11-3)可知备用容量可比像数和火、水电站的各种备用容量数值有关。根据实际资料，我们在远景规划设计中可



以采用负荷备用数值为2%。这和电站种类无关。事故备用的数值对于水火电站来说应有所不同，上面我们已经说过，水电站事故率低，事故备用比火电站少，在计算中我们考虑可采用7%，而火电站则考虑采用10%。关于检修备用对火电站可以平均采用3%，对水电站可以平均采用2%。因此我们根据公式(11-3)即可求得水火电站备用容量的可比系数为 $k_{\text{peg}}^N = 1.036$ 。

上面我们已经分别求得 $k_{\text{CH}}^{N,7}$ ， $k_{\text{17m}}^{N,7}$ ， k_{peg}^N 等数值，

因此根据公式(11)及公式(20)即可求得 k^N 及 k^7 数值：即

$$\begin{aligned} k^N &= k_{\text{CH}}^N \times k_{\text{17m}}^N \times k_{\text{peg}}^N = 1.081 \times 1.036 \times k_{\text{17m}}^N \\ &= 1.12 k_{\text{17m}}^N = f(p, l) \quad (23) \end{aligned}$$

$$k^7 = k_{\text{CH}}^7 \times k_{\text{17m}}^7 = 1.081 \times k_{\text{17m}}^7 = f(p, l) \quad (24)$$

根据公式(23)(24)我们可以作出水火电站容量及电量可比系数和 p, l 的函数图，(见查一)，由查可知，在已知水火电站的输送容量及输送距离的情况下水火电站的容量及电量的可比系数即可从查上求得。例如当输送容量为20万千瓦，水电站输送距离为200公里，火电站输电损失可以忽略不计，则可从查一上找到 $k^N = 1.068$ ， $k^7 = 1.031$ 。这就是说为了满足同样容量20万千瓦，火电站的装机容量应该比水电站多装6.8%，而发电量应该比水电站多3.1%。

根据查一分析来看，水火电站容量及电量可比系数一般都大于1，当输电距离在400公里以内时，水火电站的容量可比系数大致在1.06—1.16之间变动，而电量可比系数大致在1.025—1.11之间变动。这些系数说明，要使水火电站在动力系统中发挥相等的效能效益，必须使火电设备容

另及发电另都要大于水电设备容量及发电另。正如前面指出的，这是因为火电厂比水电厂的厂用电大，事故率高，检修时间长，所需要的厂用电及备用容量都比较大，虽然考虑水电厂输电损失但也仍不能相互抵消，有时甚至增大。所以在动力系统的规划设计中，在水火电电源方案选择的比较中必须考虑它们的容量及电另可比像数。

下面我们举一个简单例子来说明在水火电方案比较中由于考虑这些可比像数后，对水火电方案选择的影响。例如某水电站容量为10万瓩，年利用小时数为4500小时，单位造价为1250元/瓩，每度电成本为0.008元，火替水电站单位造价为650元/瓩，发电成本为0.03元/度，其中燃料费用佔60%即0.018元/度，规定补还年限为5年。根据平常设计中所采用

$$\text{的公式 } Z = \frac{K_F - K_T}{N_T - N_F}, \text{ 我们求得 } Z = \frac{10^5(1250 - 650)}{10^5(0.03 \times 4500 - 0.008 \times 4500)} \\ = 6 \text{ 年。}$$

即说明该水电站方案没有火电站方案经济，但如考虑水火电站的容量及电另可比像数，我们采用 $N^V = 1.1$ ， $N^F = 1.08$ ，那么

$$\text{可以求得 } Z = \frac{10^5(1250 - 1.1 \times 650)}{10^5(0.03 \times 4500 + 0.018 \times 4500 \times 1.08 - 0.008 \times 4500)} \\ = 4.95 \text{ 年。即说明该水电站方案比火电站方案}$$

经济。

由此可见，水火电站容量及电另可比像数对水火电站方案的相对经济性有很大的影响。所以在水火电站方案比较时必须很好考虑水火电站容量及电另可比像数，否则就会导致错误的结论。

参考文献:

徐寿波 我国动力地区化和热化的若干理论问题的研究
(副博士论文) 1960年.

徐寿波 动力系统合理水火电比的确定方法和原理
(北京市电机工程学会年会论文报告). 1962.

杨志嵘 动力系统合理结构的选择 1962.
(研究报告)