

哈爾濱工業大學講義

電網暨電力系統專題

下 冊

輸配電教研室編譯



1954

電網暨電力系統專題

輸配電教研室編譯

哈爾濱工業大學

1954

前 言

本講義是根據蘇聯專家、副教授、技術科學碩士、拉式可夫同志（Ф.П.Лашков）1953—1954 年為本校輸配電專門化四、五年級所開「電力網絡及電力系統專題」課程的聽課筆記加以整理編譯的。講義分上下兩冊，上冊的內容是：遠距離輸電不均勻線路及系統中功率的合理分佈；下冊是電力網絡設計的諸問題。講義可供電機系輸配電專門化作教材用，也可供電網電力系統工作者參考。

講義定稿後專家業已回國，故未能請專家最後審閱，錯誤之處在所難免，望讀者指正，以便修改。

哈爾濱工業大學輸配電教研室
1954年12月

目 錄

第 一 章 電力網絡設計的主要問題及原則.....	1
1. 緒論.....	1
2. 設計的主要標準.....	8
3. 電力網絡的設計方法.....	13
第 二 章 電力絡網接線圖的構成原理.....	35
1. 各種網絡接線圖的特性及其優缺點.....	35
2. 各種網絡接線圖的使用範圍.....	38
第 三 章 電力網絡的調壓問題.....	39
1. 緒論.....	39
2. 容許的電壓偏移及電壓損耗.....	39
3. 幾種調壓方法的討論.....	41
第 四 章 各種網絡設計的特點.....	45
1. 低壓戶內網絡.....	45
2. 城市網絡.....	47
3. 工廠網絡.....	53
4. 區域網絡.....	59
5. 長距離輸電線.....	62

電力網絡的設計

第一章 電力網絡設計的主要問題及原則

1. 緒 論

電力網絡方面的工作可以分成三大類，即已有設備的運行，新設備的設計及新設備的建造。這三項工作中以設計工作最為複雜，因為在設計中往往有許多有關的因素在網絡建成或運行前無法肯定，需要作適當的估計；而且在許多問題的決定上，並沒有完全一定的方法，故必須根據各種具體情況及豐富的設計經驗來選定最好的方案。

電力網絡按其用途可分成戶內網絡、城市網絡、工廠網絡及區域網絡四種。這些網絡有共通的地方，也有特殊的地方。因此，關於網絡設計的問題也可以從兩方面來討論；一方面是就其共通的地方來討論網絡設計的一般問題；另一方面是就各種網絡的特點來討論其設計方法。

網絡設計的主要步驟如下：

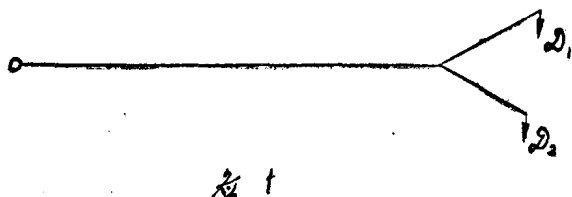
- (1) 決定負荷；
- (2) 決定網絡電壓、網絡接線圖、變壓器容量及變電所的接線圖；
- (3) 選擇線路及變電所各部分的設備；
- (4) 編製計劃書及預算書。

決定負荷是一件相當複雜的工作。一個單獨的燈或一個單獨的電動機是最簡單的負荷；可是整個一層樓的照明負荷或整個工廠的動力負荷就比較不容易決定，因為所有的燈不會在同一時候開，所有的電動機也不會在同一時候達到滿載。此外，電動機本身有損耗，電動機的出力與其自網絡取得的功率並不相等，因此，在估計網絡負荷時，還須考慮電動機的效率。當電燈或電動機數目不多時，考慮這些因素或不考慮這些因素差別不大；但在電燈或電動機數目相當多時，這些因素的影響

就很大。過去有許多設計就往往因為沒有考慮這些因素而得到錯誤的結果。

網絡中的負荷是經常在變的，因此很難確定一個合適的運算負荷。通常採用以下兩種方法來確定運算負荷：

(1) 負荷曲線重疊法：以一簡單的工廠網絡為例，若此工廠網絡供電給兩台電動機 D_1 和 D_2 (圖1)，其負荷曲線如圖 2 所示，則幹線的運算負荷不是二台電動機額定容量的和，而是合成的負荷曲線的最大負荷。



這種方法在負荷曲線種類不多時用起來很方便，否則就不適用了。

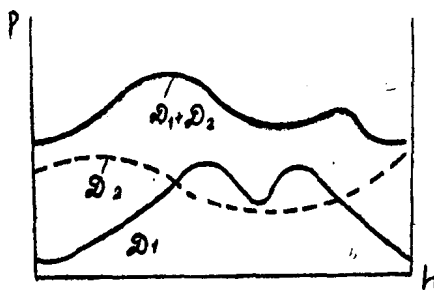


圖 2

(2) 係數修正法：這種方法用得比較普遍，在總的設備容量上乘以某係數，便得到設計所需的運算負荷。以前採用兩種係數，即參差係數 (коэф. одновременности) 及負載係數 (коэф. загрузки)，現在將二者合併成一個係數，叫使用係數 (коэф.

спроса)。各係數的定義如下：若以 $K_{одн}$ 表示參差係數， $P_{пр. раб}$ 表示最大負荷時實際的聯接容量， $P_{пр}$ 表示總設備的聯接容量，則

$$K_{одн} = \frac{P_{пр. раб}}{P_{пр}}$$

若以 $K_{загр}$ 表示負載係數， $P_{расч}$ 表示實際的最大負荷 (即運算負荷)，則

$$K_{загр} = \frac{P_{расч}}{P_{пр. раб.}}$$

若以 $K_{спр}$ 表示使用係數， $P_{уст}$ 表設備容量，則

$$K_{спр} = \frac{P_{расч}}{P_{пр}} = \frac{\eta P_{расч}}{P_{уст}}$$

式中 η 為受電器的效率。故

$$K_{спр} = K_{одн} \times K_{загр}$$

對於照明負荷 $P_{уст} = P_{пр}$ ，對於動力負荷 $P_{уст} = \eta P_{пр}$ ，又對於照明負荷， $K_{загр} = 1$ ，故 $K_{спр} = K_{одн}$ 。

下面兩個表是各種負荷的使用係數：

表 1 照明負荷的使用係數（參差係數）

負 荷 性 質	使 用 係 數
大樓的戶內照明	0.5—0.8
一所住宅的戶內照明	0.8—1
戶外照明	1

表 2 工廠負荷的使用係數

負 荷 性 質	使 用 係 數
金屬加工廠及機器製造廠	0.15—0.3
化學工廠	0.2 — 0.4
紡織工廠	0.4 — 0.6
木材加工廠	0.15—0.3
輕工業及食品工業工廠	0.2 — 0.4

區域網絡所包括的範圍極廣，其設備容量或聯接容量極不容易確定，要用上述關係來求運算負荷，實際上有困難。因此可採用下列關係：

$$K_{одн} = \frac{P_{макс.сумм}}{\Sigma P_{макс}}$$

式中 $P_{макс.сумм}$ —— 合成負荷的最大值，即設計所需的運算負荷；

$\Sigma P_{макс}$ —— 各負荷最大值之和。

下表示區域網絡的參差係數

表 3 區域網絡的參差係數

網 格 性 質	參 差 係 數
負荷爲均一：變電所數目不超過 20 — 30	0.9 — 0.95
變電所數目達 30 — 50	0.75 — 0.8

從以上各表看來，雖然對於各種不同的網絡及不同的負荷各有其參差係數或使用係數，但此類係數變化的範圍還是相當大，其上下限達 2 與 1 之比；究竟在此範圍內應該取那一個數值還是很難確定，因此在確定使用係數時，還需用下列方法之一來校驗其正確性。

(i) 利用產品單位產量所消耗的能量來計算，在使用這方法時，當然還須考慮到產品單位產量的能量消耗是隨其加工方法而不同的。若

A 爲全年消耗的總能量；

a 爲產品單位產量的能量消耗；

K 爲產品全年產量，則得

$$A = a \times K$$

知道了全年的能量消耗，並查出該類負荷的最大負荷使用時間 $T_{\text{макс}}$ ，即可按下式求出運算負荷：

$$P_{\text{расч}} = \frac{A}{T_{\text{макс}}}$$

(ii) 用單位生產面積的容量來確定負荷。此法在確定照明負荷時尤其用得多。

(iii) 用技術上的計算以確定負荷。各種企業有其各自的生產特點，調查、了解其生產過程後，可以知道其同時使用的最大負荷；設計時則取較此值略大的運算負荷。

將由這些輔助方法算出的運算負荷與用 $K_{\text{спр}}$ 算出的運算負荷核對，如果誤差不超出 10%，則可以認爲很滿意了；若誤差太大，則表示負荷估計得不够準確，須作更仔細的分析，務使這兩種方法求得的結果互相接近。

下列兩表表示各種產品的電能消耗率及各種企業的 T_{max} 之值。

表 4 各種產品的電能消耗率

企 業 性 質 及 產 品 名 稱	電 能 消 耗 率
紡紗工業	40 kWh/T
有色金屬工業	
鋁	18000—2000kWh/T
粗銅	1000 kWh/T
精煉銅	450 kWh/T
黑色金屬工業	
馬丁鋼	10—17 kWh/T
壓延金屬	65—150 kWh/T
鑄鐵	40—60 kWh/T
化學原料工業	
硫酸	70—120kWh/T
機械製造業	
拖拉機	5000—8000kWh/台
汽車	1500—2000kWh/輛
燃料工業	
無烟煤	16—17 kWh/T
褐炭	10—12 kWh/T
造紙工業	
紙	400—800 kWh/T

表 5 各種企業的 T_{max} 之值

企 業 名 稱	T_{max} 之值(小時數)
冶金工業	6500
化學工業	5500

表 5 (續) 各種企業的 $T_{\max}$ 之值

企 業 名 稱	$T_{\max}$ 之值(小時數)
機械製造業	5000
印刷工業	3000
紡織工業	4500
製鞋工業	3000
木材加工業	2500

用產品能量消耗率決定最大負荷的方法應用得最普遍，但因為產品能量消耗率和 $T_{\max}$ 之值都不是很準確的（前者因加工方法不同而不同，後者也僅為統計數值），故所得的結果不甚準確，必須與別種方法的結果核對應用。

以上所講的都是指純功負荷的確定，實際上受電器的功率因數往往不等於 1，所以除了從網絡取用純功率外，還要取用無功功率。低壓城市網絡的負荷主要是照明負荷，故可以假定其功率因數為 1；但隨着螢光燈的發展，低壓照明網絡的功率因數也將不等於 1 了。高壓照明網絡由於有變壓器，其功率因數約為 0.95 即 $\frac{P_r}{P_a} \approx 33\%$ 。

供給工業用電的網絡，其功率因數尤其低，這並不是因為電動機的功率因數這樣低，因電動機在額定功率下工作時，功率因數平均高達

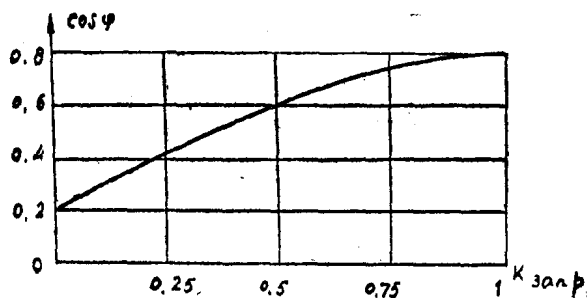


圖 3

0.8；可是在網絡裡電動機的負載係數往往很小，這從前面的使用係數的數值上也可以看出，因為使用係數就是由參差係數和負載係數合成的。電動機的功率因數是其負載係數的函數，圖3的曲線就表示這種關係。所以實際上電動機在使用時，其功率因數往往在0.5—0.6左右。

功率因數過低會造成運行上的浪費；首先，如果要發電機輸送出過多的無功功率，則其所輸出的純功功率就必須減小；大型發電機的功率因數約為0.85，如果要在低於0.85的功率因數下運行，就不能達到額定出力，因而使發電廠的設備，如鍋爐、透平等不能充分利用。另外，輸送的無功功率大，則線路上能量損耗也大，尤其在區域網絡中，由於線路長，這種損耗往往達到很大的數字，因此我們總是儘量想辦法提高負荷的功率因數。提高功率因數的方法很多，最常用的是用一部分同步電動機代替異步電動機。同步電動機超激運行時能輸出無功功率，因而能減輕網絡中的無功負荷；另外，也可以裝置靜電容電器來改善功率因數。

爲了獎勵用戶提高其功率因數，在蘇聯規定了一種制度：電價隨負荷的功率因數而變，功率因數以0.85爲標準，高於此值則電價可以打一折扣，低於此值，則電價要提高。因此，在蘇聯，區域網絡的功率因數大都能達到0.85。

由於變壓器及線路中無功功率損耗很大（在區域網絡中，由於線路電抗大，故線路中無功功率損耗很大；在工廠網絡中，則無功功率損耗主要在變壓器中），因此要求負荷的功率因數能高於0.85，譬如，等於0.9，這樣就不致爲了供給線路及變壓器中無功功率的損耗，而將發電機端的功率因數降低。

由於以上所說的原因，在確定負荷時就不但要確定純功負荷，而且還要確定無功負荷。

確定無功負荷的方法有二：

- (1) 根據無功負荷曲線圖；
- (2) 根據使用係數及平均功率因數 (средний взвешенный

коэф. мощности) *, 求運算無功負荷。

在確定負荷時，還須考慮到供電的可靠性，即是否需要備用的問題。一般的情況是這樣：在區域網絡裡大都需要備用（有時不是全部網絡，而僅是一部分網絡需要備用），低壓網絡所需的備用容量較高壓網絡為小。

2. 設計的主要標準

簡單說來，在比較各種方案決定取捨時，在保證供電質量及滿足所要求的可靠性的先決條件下，唯一的標準就是經濟。經濟問題包括兩方面：一是投資，一是年運行費。在年運行費裡又包括以下三項：

- (1) 工作人員的薪金；
- (2) 修理和折舊費；
- (3) 線路及變壓器中的能量損耗。

第一項對不同的設計方案基本上沒有差別，所以在比較方案時可以不考慮。

第二項中的日常修理費，須根據網絡在運行中的情況而決定。運行中的網絡在每年開始時，即做出該年的日常修理費的預算；可是在設計時要預先估計到將來可能需要的修理費是很不容易的，所以只能根據過去網絡運行的經驗做出統計數字，將網絡各部分所需的平均日常修理費用以其本身價值的百分數表示。

第二項中的折舊費是這樣的意思：各種設備都有其一定的使用期

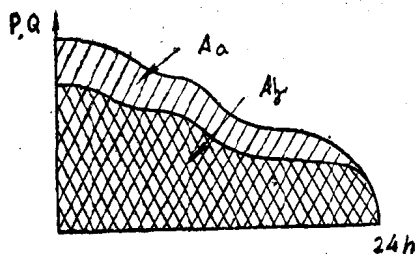


圖 4

* 從純功負荷求無功負荷時所用的 $\cos\varphi$ 不應當是最大負荷時的 $\cos\varphi$ ，而應當用全年或全日的平均值，即不應當用瞬間的 P 及 Q 求 $\cos\varphi$ ，而應當用能量 A_a 及 A_r 求 $\cos\varphi$ ，如圖 4 所示 $\lg\varphi_{cp. \text{взв.}} = A_r/A_a$ 。在蘇聯，每條線路上都裝有純功與無功電力表，所以很容易求出平均功率因數 $\cos\varphi_{cp. \text{взв.}}$ ，

限，過了這期限，舊的設備就不能用了，必須置換新的。置換新設備所需的資金，必須在該設備開始運行時起，每年留出一部分，積到該設備的使用期滿時，所積的資金恰够置換新設備，這每年留出的資金就叫做折舊費，用設備本身價值的百分數表示。

各種設備的使用期限不同，故其折舊費的百分數也不同；使用年限長的，百分數小，反之，則大。例如：未經防腐劑處理的木桿，經過五年即腐爛而不能用，爲了五年後有資金置換新木桿，每年必須留出相當木桿價值 $\frac{1}{5}$ 的資金，即木桿價值的20%；如果將木桿用防腐劑處理過，則其使用期限大大增加，能達12—25年，因而每年所需扣除的折舊費的百分數也小。假定使用期限爲20年，則每年所扣除的折舊費僅爲5%。當然，在這種情況下木桿本身的價值已較未處理時高；但在大多數的情況下，還是用處理過的木桿比較經濟。

有些設備非常堅固，像鐵塔，可以使用五十年，其折舊費百分比就很小，導線，尤其是銅線，雖然在空氣中可能氧化，在運行中絞線的個別線股也可能折斷，但一般說來還是算很耐用的，其使用期可以算爲50年。但是在設計的時候折舊費就不能按2%算，因爲負荷是不斷在增長，往往遠在達到使用期限前，網絡的容量就不够而必須改建。所以設計時不能按設備實際的使用年限算，而應該按從網絡開始運行到網絡改建這一段時期計算，一般網絡經過30—40年就需改建。在負荷增長較快的地方，這期限還要縮短。此外，還需考慮到這樣一個問題：網絡的改建不是由於導線陳舊而不能使用，因此拆除下來的銅線還能產生一部分殘餘價值（остаточная стоимость）。

實際上在設計時，並不是採用各種設備單獨的折舊費（如桿塔的折舊費，絕緣子的折舊費等），而是將各種設備合在一起，取一平均的折舊費作爲線路的折舊費或變電所電氣設備的折舊費。下表所示的修理及折舊費的百分數都是統計數字。

表 6 線路及變電所設備的修理及折舊費

設 備 名 稱	日常修理費的百分數	折舊費的百分數
使用未經處理的木桿的架空線路	5.7%	8.3%
使用處理過的木桿的架空線路	3%	5.5%
使用鐵塔的 35—220 kv 的架空線路	0.8%	3.2%
高壓電纜	2%	3.5%
變壓器	2%	3.5%
電廠及變電所的電氣設備（如斷路器、隔離開關等）	3%	7%

第三項討論線路及變壓器中能量損耗的問題。變壓器中的能量損耗與所選變壓器的大小及台數有關。變壓器的台數是根據對備用的要求及負荷曲線的變化情況而決定的。如果不要求備用，輕負荷的時候也很少，則可以選用一台變壓器。如果需要備用或輕負荷的時候很多，宜於在輕負荷時切除一部分變壓器，可以選用兩台或兩台以上的變壓器，根據技術經濟比較而確定。

線路中的能量損耗與導線截面積有關：導線截面積大，則能量損耗小，但線路的修理折舊費就增加。所以必須選擇這樣的導線截面積，使能量損耗的費用與修理折舊費的和為最小，即

$$К_{\text{еж}} = К_{\text{потери}} + К_{\text{отч}}$$

為最小；符合這樣條件的導線截面積叫做經濟截面積；

式中 $К_{\text{еж}}$ —— 年運行費
 $К_{\text{потери}}$ —— 損耗能量的價錢
 $К_{\text{отч}}$ —— 修理折舊費。

$$\text{又} \quad К_{\text{потери}} = \frac{3I^2 R \tau \alpha}{1000} = \frac{3I^2 \rho l \tau \alpha}{1000 S}$$

式中 I —— 電流 (A)

$$R \text{ —— 線路電阻 } (\Omega) \quad R = \frac{\rho l}{S}$$

τ —— 損耗時間

α —— 每kwh電能的價值

l —— 線路長度 (km)

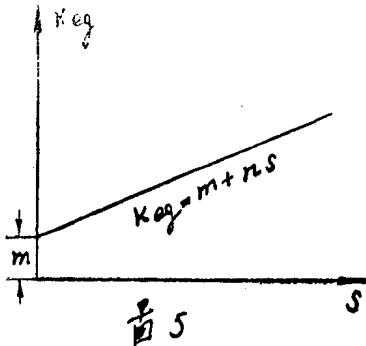
單位長度線路的成本可以分為兩部分：一部分與導線截面積無關，

以 m 表示；另一部分正比於導線截面積，以 nS 表示，則

$$K_{eq} = (m + nS)l$$

$$K_{отч} = \frac{p}{100}(m + nS)l$$

式中， p —— 折舊費及修理費的百分數。總運行費為損耗能量的價錢及修理折舊費之和，即



$$K_{\text{ж сумм}} = \frac{3I^2 \rho l \tau \alpha}{1000S} + \frac{p}{100}(m + nS)l$$

使上式對導線截面積的一次微分等於 0，即能求出導線的經濟截面積。

$$\frac{d(K_{\text{ж сумм}})}{dS} = -\frac{3I^2 \rho l \tau \alpha}{1000S^2} + \frac{pn}{100} = 0, \text{ 即 } \frac{3I^2 \rho l \tau \alpha}{1000S} = \frac{pn}{100},$$

也就是說，最經濟的條件是：損耗能量的價錢等於與導線截面積有關部分的修理折舊費。這時候導線的截面積 $S_{\text{эк}}$ 就是經濟截面積。

$$S_{\text{эк}} = I \sqrt{\frac{3\rho \tau \alpha}{10pn}}$$

若僅考慮與導線截面積有關的部分，則可以寫出這樣的關係，

$$K_{\text{ж. опт}} = K_{\text{потери. опт}} + K_{\text{отч. опт}}$$

式中 $K_{\text{ж. опт}}$ —— 最經濟的年運行費

$K_{\text{потери. опт}}$ —— 相當於年運行費最小的損耗能量價錢

$K_{\text{отч. опт}}$ —— 相當於年運行費最小的線路修理折舊費（不包括與導線截面積無關部分）

採用經濟截面積時， $K_{\text{потери опт}} = K_{\text{отч. опт}}$

現在再研究一下，如果所取的截面積不等於經濟截面積，而等於經濟截面積乘上某一係數 a ，即 $S = aS_{\text{эк}}$ ，則年運行費 $K_{\text{ж}}$ 與最經濟的年運行費 $K_{\text{ж. опт}}$ 相差多少？

$$K_{\text{ж}} = \frac{3I^2 \rho \alpha}{1000aS} + \frac{p}{100} a n S = \frac{K_{\text{потери. опт}}}{a} + a K_{\text{отч. опт}}$$

$$= K_{\text{потери. опт}} \left(\frac{1}{a} + a \right) = \frac{1}{2} K_{\text{ж. опт}} \left(\frac{1}{a} + a \right)$$

$$\frac{K_{\text{ж}}}{K_{\text{ж. опт}}} = 0.5 \left(\frac{1}{a} + a \right)$$

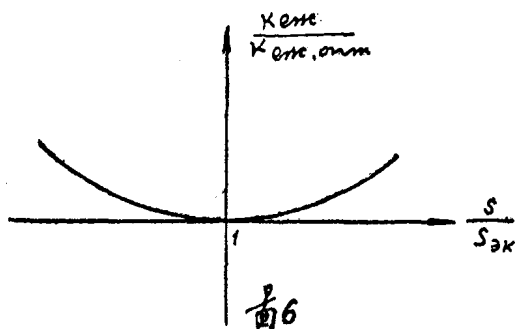
當 $a \neq 1$ 時 (即 $S \neq S_{\text{эк}}$)， $\frac{K_{\text{ж}}}{K_{\text{ж. опт}}} > 1$

$\frac{K_{\text{ж}}}{K_{\text{ж. опт}}}$ 與 a 的關係

表 7

a 之 值	$\frac{K_{\text{ж}}}{K_{\text{ж. опт}}}$ 之 值
0.8	1.025
0.9	1.005
1.0	1
1.1	1.005
1.2	1.016

圖 6 的曲線就表示這種關係。



由以上的表或曲線，可以得出如下的結論：

- (1) 導線截面積異於經濟截面積時，年運行費一定增加；
- (2) 導線截面積對於年運行費的影響不大。

所以當不可能採取經濟截面積時，寧可採取較經濟截面積略小的導線，因為這樣，比起採用大於經濟截面積的導線時，年運行費一樣增加，而投資却減小了。在蘇聯，為了節省投資，常採用較經濟截面積略小的導線。

在比較方案決定取捨時，既要考慮到運行費，又要考慮到投資，因而可能發生兩種情況。假定有兩個技術指標都合格的方案，並假定

$K_{1ед}$ ——第一個方案所需的投資

$K_{1еж}$ ——第一個方案所需的運行費

$K_{2ед}$ ——第二個方案所需的投資

$K_{2еж}$ ——第二個方案所需的運行費

若 $K_{1ед} > K_{2ед}$, $K_{1еж} > K_{2еж}$,
則很明顯，第二個方案較第一個好。

若 $K_{1ед} > K_{2ед}$, $K_{1еж} < K_{2еж}$,
則單憑這結果就很難決定究竟那一個方案比較經濟，必須作進一步的分析。設

$K_{окуп}$ ——收回年數，則

$$K_{окуп} = \frac{K_{1ед} - K_{2ед}}{K_{2еж} - K_{1еж}}$$

若 $K_{окуп} \leq 5$ ，到應該選擇運行費較小的方案；若 $K_{окуп} > 15$ ，則應該選擇投資較小的方案；若 $5 < K_{окуп} < 15$ ，則不易肯定究竟那個方案經濟，還須根據其他具體條件作進一步的分析。

但是，要準確地確定 $K_{ед}$ 及 $K_{еж}$ 也是很困難的，因為關於各種設備的價錢的資料有時不全，在這種情況下要用價錢來比較方案就有困難，可以儘量想法避免用價錢，而從設備的性質、大小，數量等的比較來決定合適的方案（例如所需斷路器組的多少，線路的長短，有色金屬消費量等的比較）。