

消弧設備的選擇、 裝設和運行

苏联 Ф. А. 李哈乞夫著

電力工業出版社

消 弧 設 备 的 选 擇 裝 設 和 运 行

苏联 Ф. А. 李哈乞夫著

吳維誠 熊曉農譯

电 力 工 業 出 版 社

內 容 提 要

本書論述了在 6—110 千伏網路中消弧設備的選擇、裝設和運行等問題，以及在常態和接地時消弧設備和網路的參數、電壓、電流間的電學關係。

本書專供從事於電網設計和運行的工程技術人員和高等、中等動力學校學生使用。

Ф. А. ЛИКАЧЕВ

ВЫБОР, УСТАНОВКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ
ДУГОГАСЯЩИХ АППАРАТОВ

根據蘇聯國立動力出版社 1955 年莫斯科版翻譯

消弧設備的選擇、裝設和運行

吳維誠 熊曉農譯

*

296D109

電力工業出版社出版(北京府右街26號)

北京市書刊出版總局登記證出字第082號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

*

編輯：杜全恩 校對：趙廣淵

787×1092 $\frac{1}{32}$ 開本 * 6 $\frac{1}{2}$ 印張 * 116千字 * 定價(第9類)1.22元

1956年2月北京第1版

1956年8月北京第2次印刷(2,601—6,630冊)

目 錄

引 言	3
第一章 網路的主要參數和各電學數值間的關係	5
1-1. 沒有接地時中性點不接地的網路	6
1-2. 沒有接地時中性點經過補償的網路	12
1-3. 綫路的换位	20
1-4. 補償網路中綫路逐相斷開時的中性點位移	25
1-5. 在中性點不接地和經過補償的網路中的接地現象	39
1-6. 過渡階段的接地電流	55
第二章 消弧設備的選擇	68
2-1. 消弧設備的形狀	68
2-2. 消弧設備容量及裝設地點的選擇	74
2-3. 與消弧綫圈連接的變壓器	77
2-4. 連接方式、信號和監視	81
第三章 消弧設備的裝設	90
3-1. 在戶外變電所內消弧設備的裝設	90
3-2. 在戶內配電裝置內消弧設備的裝設	90
3-3. 消弧設備的投入運行	92
第四章 消弧設備的運行	93
4-1. 消弧設備調諧值的選擇	93
4-2. 消弧設備的操作	101
4-3. 尋查網路內接地短路點的程序	103
4-4. 消弧設備運行時的監視	105
4-5. 中性點不接地和經過補償的網路中的測量	109
4-6. 網路不對稱電壓和中性點位移的測量。	
電容電流值的估算	111
5-2. 網路單相金屬性接地法	118

5-3. 在中性點上接入外加电压法	127
5-4. 經過电阻的網路單相接地法	131
5-5. 監視和信号回路的檢驗	137
附 錄	140
Π-1. 架空綫的不对称度和單位長度电容电流	140
Π-2. 三芯電纜的充电电流和接地电容电流	141
Π-3. 莫斯科变压器廠消弧綫圈的主要数据	142
Π-4. 卡尔·李卜克內西变压器廠消弧綫圈主要型式数据	143
Π-5. 試驗程序的表式和举例	144
Π-6. 在欠補償情况运行的 60 千伏補償網路的故障	147
Π-7. 由一相傳到另一相的虛幻接地現象	150
Π-8. 变电所（發電廠）消弧設備動作記錄單	153

引 言

電網的運行經驗顯示出，單相對地的絕緣事故在綫路和設備的絕緣事故次數中佔主要地位。這種事故在中性點直接接地的網路裏要引起運行上的嚴重停電。由此規定了在3—60千伏網路中應按接地電容電流值使中性點不接地或經過補償接地來運行。即使在110千伏網路，如果單相短路電流的電磁效應對重要的通訊綫或鐵道自動閉塞回路帶來很大損害或者由於土壤的高電阻率無法保證繼電保護的明確而又具有選擇性的動作時，亦可能有必要將它轉變為經過補償的中性點運行方式。

消弧設備的選擇、安裝和運行等問題並不複雜，但是由於在這方面缺乏足夠的指導性資料，在運行中讓它存在的錯誤常引起危險的中性點位移，中性點電壓振盪，及在故障中所形成的各種虛幻接地現象。

中性點經過補償的架空及電纜網路的運行曾屢次發生在網路不同地點綫路和設備絕緣的併發事故情況，管型避雷器的大量動作，以及因網路各相對地的極大不對稱電容現象（由電弧接地和斷綫造成）所引起的閘型避雷器的損壞。

同時消弧設備的運行，除了使用時的經常監視，及按網路形狀範圍的變化對調諧值作及時和正確的選擇外，應能保證：

- 1) 迅速消除對地故障，避免網路絕緣受很長時期電弧過電壓的作用；

- 2) 允許網路於接地中繼續運行，當這樣運行時要能在負荷不降低用戶不停供的情況下查出及隔離故障區段；

- 3) 不論在網路正常情況及在各相對地電容的對稱性受到各種

破坏情况時，消弧設備的調諧值不致使各相对地电压值危害絕緣。

本書根据作者在 6, 15, 35, 60 及 110 千伏網路中所進行的苏联國家電業聯合改進局 (ОРГРЭС) 多年試驗調整工作的經驗寫成。

編書時亦部分引用了所提到的电容电流實測結果和消弧設備試驗結果，補償網路的运行經驗和它的一些事故分析。

書內材料分为五章，其中第一章包括了網路在常态及各种故障状态時網路和消弧設備的电压，电流，參數間的所有基本關係，書中还提供了決定消弧設備的選擇，安裝和运行的基本理論。

根据材料的研究範圍引用了計算实例來闡明網路和消弧設備規範參數和电压电流間的關係，調諧值的選擇，操作的作用，故障點查定的程序等。

書中引有以提高補償網路运行可靠性为目的的一些基本導則，和防止对运行作出不正確決定和操作的指示。

第一章 網路的主要參數和 各電學數值間的關係

在中性點上接入可調整電感的網路(補償網路)的特點是網路和消弧設備的參數對於常態時各相對地電壓及接地時經過故障點的電流有很大影響。這些參數是:

- 1)各相對地電容值;
- 2)預定在發生接地時產生流經故障點的電感性電流的設備的電感值;
- 3)網路的洩漏電導和消弧設備的有效損失。

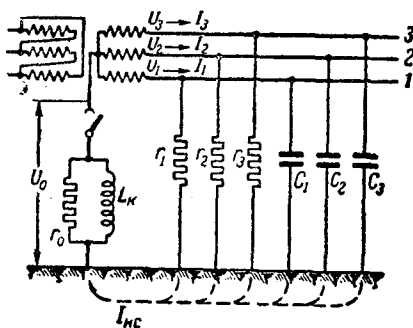


圖 1-1 補償網路的等效接綫圖

圖 1-1 表示補償網路的三相等效圖，它在消弧綫圈打開時網路本身就成為在中性點不接地情況下工作。

在這圖裏:

C_1, C_2, C_3 ——各相對地電容;

L_k ——消弧綫圈的電感;

r_1, r_2, r_3 ——綫路及變電所各相絕緣的洩漏電阻;

r_0 ——決定由消弧綫圈內有效損失引起的補償電流的有效分量的電阻;

U_1, U_2, U_3 ——網路的相電壓;

U_0 ——中性點電壓;

I_1, I_2, I_3 及 I_0 ——各相電容電流及地中零序電流。

为了說明各电压电流間的基本關係和它們同主要參數的關係最好先考察網路沒有接地時的工作情況，然後再考察網路接地時的工作情況。

1-1. 沒有接地時中性點不接地的網路

中性點不接地網路工作所具有的特點是在中性點上存在着一些对地电压，称为不对称电压 U_{nc} ，这电压的產生主要是由於導綫在地面上的不对称佈置使各相对地电容值不等的緣故。在相同的相电压值和網路洩漏电導情況下不对称电压決定於綜合电容电流和对地的導納值。

$$\begin{aligned}\dot{U}_{nc} &= U_{\phi} \frac{j\omega C_1 + a^2 j\omega C_2 + a j\omega C_3}{j\omega(C_1 + C_2 + C_3) + \frac{3}{r}} = U_{\phi} \frac{C_1 + a^2 C_2 + a C_3}{C_1 + C_2 + C_3} \\ &\times \frac{1}{1 - j \frac{3}{r\omega(C_1 + C_2 + C_3)}} = U_{\phi} \times \dot{u}_0 \frac{1}{1 - jd}. \quad (1-1)\end{aligned}$$

在这式和以後的电压向量的序位採用順時鐘指針轉向；正的角度計量方向——反時鐘指針轉向。

U_{ϕ} ——正常相电压的絕對值。單位向量

$$1; a = -\frac{1}{2} + j\sqrt{\frac{3}{2}} \text{ 及 } a^2 = -\frac{1}{2} - j\sqrt{\frac{3}{2}}$$

決定各相电压 U_1, U_2 及 U_3 間 120° 的角位移，亦即 $\dot{U}_1 = U_{\phi}$ ；

$\dot{U}_2 = a^2 U_{\phi}$ 及 $\dot{U}_3 = a U_{\phi}$ ；

$\dot{u}_0$ ——由各相对地电容不等所引起的網路不对称度。

d ——由电導及电容納間比值所引起的網路阻尼率。

現在簡單地分析一下和不对称度及阻尼率有關的主要參數。

A. 網路的不对称度指網路不对称电压和正常相电压的比值或不对称电流 I_{nc} 和全电容电流的比值。

阻尼率对它的微小影响这时可略而不计。

不对称度可表示成：

a) 百分比

$$u_0 = \frac{U_{nc}}{U_{\phi}} \cdot 100 = \frac{I_{nc}}{I_c} 100 = \left| \frac{C_1 + a^2 C_2 + a C_3}{C_1 + C_2 + C_3} \right| \times 100 [\%] \quad (1-2)$$

(如果網路中性點有直接接地的，這情況下不對稱電流才能流動；它是由網路的不對稱電壓和各相對地全電容電納所引起的)；

6) 標么值

$$\dot{u}_0 = \frac{1 + a^2 m_2 + a m_3}{1 + m_2 + m_3} = \frac{a^2 \Delta C_2 + a \Delta C_3}{3 C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3}, \quad (1-3)$$

其中 $m_2 = \frac{C_2}{C_1}$ 及 $m_3 = \frac{C_3}{C_1}$ —— 以最大電容 C_1 為單位的各相應相的電容比值。

係數 m 恒為正值；它等於或小於一。相應相電容減少的絕對值

$$\Delta C_2 = C_2 - C_1 \text{ 及 } \Delta C_3 = C_3 - C_1,$$

和取作單位電容的 C_1 相比，為：

$$\frac{\Delta C_2}{C_1} = \frac{C_2 - C_1}{C_1} = m_2 - 1 \text{ 和 } \frac{\Delta C_3}{C_1} = \frac{C_3 - C_1}{C_1} = m_3 - 1;$$

$\Delta C_{2,3}$ 恒為負值。

在絕對值上它們都等於或小於一（ m 和 ΔC —— 相電容的相應比差值和絕對差值）。

如果網路的不對稱是由於一相電容減少而引起的，則不對稱度為：

$$\dot{u}_{01} = \frac{m-1}{m+2} a^2, \quad (1-4)$$

如果不對稱是由於兩相電容同樣減少而產生的，則不對稱度為：

$$\dot{u}_{02} = \frac{1-m}{1+2m} 1. \quad (1-5)$$

例如，假定沒有換位的 35 千伏綫路按水平導綫排列裝設在門型桿塔上，則當綫間距離為 3 公尺時邊綫的對地電容要比中綫電容大出 10%。這時 $m_2=0.9$ ， $m_3=1$ ，因此，不對稱度

$$\dot{u}_{01} = \frac{m_2-1}{m_2+2} a^2 = -\frac{0.1}{2.9} a^2 \approx -0.035 a^2.$$

即約為 3.5%。

因此，不對稱電壓值約為 0.7 千伏。

從運行中的架空網路多次計算和測量曾指示出不對稱度，也就是不對稱電壓不致超出 0.5—1.5% 的範圍。超過 1% 的數值常發生在分段的架空網路，它們的換位是在變電所母綫上實現的。

電纜綫路的不對稱度等於零，因為各相芯綫對包皮說是位於對稱位置的。

不對稱度是一個向量值，它決定不對稱電壓在綫電壓三角形中的相角位置。

這值宜於用斜角座標系統表示（圖 1-2）。

圖用下列方法做成。

和作用於電容 C_1 的相電壓 U_1 相鄰的綫電壓三角形 $1, a, a^2$ 邊的一半按

$$\frac{U'_1}{U'_2} = \frac{C_2}{C_1} = m_2 \quad \text{及} \quad \frac{U'_1}{U'_3} = \frac{C_3}{C_1} = m_3$$

比值分割，其中 U'_1, U'_2 ，和 U'_3 ——由相應頂點 1， a^2 及 a 量到三角形邊 $1a$ 和 $1a^2$ 的截綫綫段。

假定打開電容 C_3 ，將有

$$U'_1 + U'_2 = U_{12} \quad \text{及} \quad U'_2 = U'_1 \frac{1}{m_2},$$

由此

$$U'_1 = \frac{U_{12} \times m_2}{1 + m_2}.$$

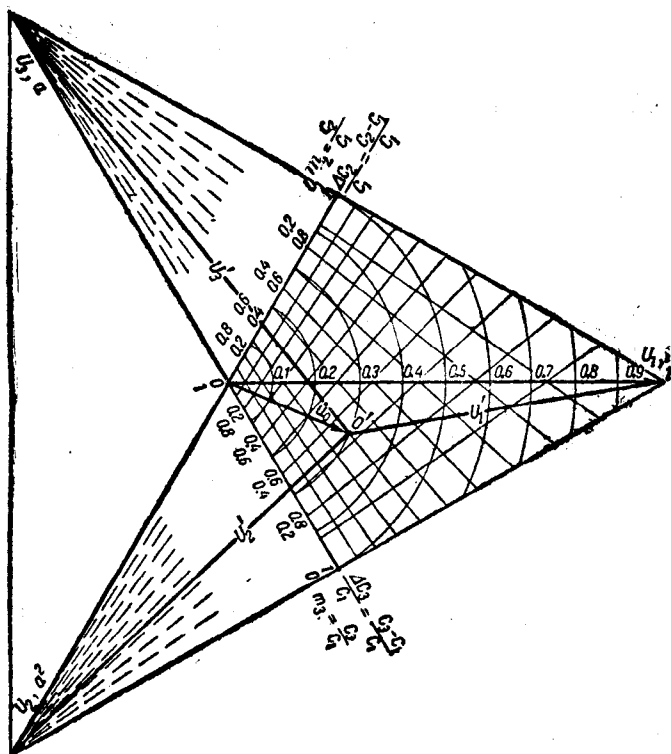


圖 1-2 決定不對稱度 $|u_0|$ 圖①

$C_1 > C_2$ 及 C_3 (C_1 —最大電容, 取為單位值); ΔC_2 及 ΔC_3 —相電容差值; m_2 及 m_3 —相電容比值。

依次使 m_2 值等於 0; 0.1; 0.2 等至 1, 即得在三角形邊 $1a^2$ 上的必要分割點, 它再和對角 (a 點) 相連。亦正一樣, 假定電容 C_2 打開, 即得綫電壓 U_{13} 按電容 C_1 及 C_3 分配。這時

① 本書全節在敘述上和圖 1-2 所示 U'_1, U'_2 及 U'_3 不甚符合; 因和 $1, a^2$ 點及 $1, a$ 點距離比為 m_2, m_3 的軌跡不是書中所敘述的以 a^2, a^2 為頂點的直綫羣, 而應是以內、外分 $1, a^2$ 點成 m_2 比, 及 $1, a$ 點成 m_3 比的分點為直徑的兩組圓羣。故圖中 U'_1, U'_2, U'_3 三向量應加 $\perp \cdot \uparrow$, 以別於本頁中所敘述的 U'_1, U'_2, U'_3 。——譯者

$$U'_1 + U'_3 = U_{13}; \quad U'_3 = U'_1 \frac{1}{m_3} \text{ 及 } U'_1 = \frac{U_{13} \cdot m_3}{1 + m_3}.$$

再將 $1a$ 綫段如 $1a^2$ 綫段以同样程序進行分割。

由三角形頂點 a 及 a^2 所引出直綫的交點是向量 $\dot{u}_0$ 的終點，它當用相电压來量度時就代表在各相不同电容比情况下的不对称电压 $\dot{U}_{nc}$ 。向量 $\dot{U}_{nc}$ 表示在綫电压三角形中中性點的位置。

由圖 1-2 可看出，在單相開路時網路的不对称度由 0 变至 -0.5 ；這時不对称电压由 0 变至 $-0.5 U_{\phi}$ 。

兩相開路(和僅合入一相相当)引起不对称度从 0 到 $+1$ 及不对称电压由 0 到 U_{ϕ} 的变化。

如圖所示，在單相開路時網路的中性點和相电压作反向移位。移位的極限位置是相应相电压負方向和对面綫电压的交點。

在兩相開路時(相等 m 值)網路中性點沿該相电容不因開路而变化的相电压而移位。

因此，在中性點不接地运行的網路中，逐相開断或合上可使中性點呈現电压(U_{nc})，歪化了各相对地的电压。

在运行中这种歪化可在監視絕緣的电压表指示值上看到，而通常是作为不完全接地現象的。但是，如果不完全接地的特徵是故障相电压的降低和——在一般情形——健全相电压的增高值不同，則对引起相电压不对称的逐相開断可有下列特性：

a) 單相部分的或完全的開断要引起那个因開断結果而使該相电容減小的相电压增加；例如，

$$\dot{U}_3 - \dot{U}_{nc} = U_{\phi}(1 - \dot{u}_0).$$

这相电压的極限值為 $1.5 U_{\phi}$ 。

其他兩相对地的电压要同样地減少：

$$|U'_2| = |U'_1| = U_{\phi} \sqrt{1 - u_0 + u_0^2}, \textcircled{a}$$

① 假定 $\dot{u}_0$ 向量方向恰和 $\dot{U}_0$ 相反，則 u_0 和 $\dot{U}_1, \dot{U}_2$ 間夾角均为 60° ，为別於上頁所提的 U'_1, U'_2 等絕對值拟改用 $\dot{U}'_1, \dot{U}'_2$ 。——譯者

这些电压的極限值

$$\frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi}=0.865 U_{\phi}.$$

6) 一下將兩相部分地或完全地斷開(或合上一相)要使那些因為斷開而电容減小的相电压增高, 亦即

$$|U'_2|=|U'_3|=U_{\phi}\sqrt{1+u_0+u_0^2}.$$

这些相电压的極限值等於綫电压。

电容維持不变的相的对地电压, 減少至極限值時, 等於零(如完全接地情形)。

B. 網路的阻尼率是網路的电導和电容电納的比值。

阻尼率用下式來表示:

a) 用百分比

$$d_{\%}=\frac{g_1+g_2+g_3}{\omega(C_1+C_2+C_3)}\times 100[\%],$$

式中 g_1, g_2, g_3 和 $\omega C_1, \omega C_2, \omega C_3$ ——各相对地的电導及电容电納。

既然电導和电納能決定接地电流的有效分量和电容分量, 則將分子分母都乘相电压值, 得到阻尼率的表示式

$$d_{\%}=\frac{I_r}{I_C}\times 100[\%], \quad (1-6)$$

式中 I_r 及 I_C ——接地电流的有效及电容分量。

在逐相斷開時电導及电容电納以同样程度減少。網路的時間常數維持不变, 亦即

$$T_C=\frac{C_1}{g_1}=\frac{C_2}{g_2}=\frac{C_3}{g_3}=\frac{C_1+C_2+C_3}{g_1+g_2+g_3};$$

所以 $\frac{C_2}{C_1}=\frac{g_2}{g_1}=m_2$ 及 $\frac{C_3}{C_1}=\frac{g_3}{g_1}=m_3$ 。

6) 用标么值

$$d = \frac{g_1(1+m_2+m_3)}{\omega C_1(1+m_2+m_3)} = \frac{g_1}{\omega C_1} = \frac{1}{r\omega C_1} = \frac{Ir}{I_C} \quad (1-7)$$

即表示接地电流的有效分量对全电容电流的比值。

由上述關係，在逐相斷開（部分或完全的）時，網路的阻尼率應維持定值。

測量顯示出，有正常絕緣情況的架空網路阻尼率不超出3—5%的範圍。較小值是60~110千伏網路的，較大值是15~35千伏網路的。

在絕緣污穢及受潮時阻尼率可能增至10%。

電纜網路阻尼率通常不超過2—4%範圍。但當電纜網路有老化絕緣存在時阻尼率可達10%。

1-2. 沒有接地時中性點經過補償的網路

在網路中接入消弧綫圈就使振盪回路形成（圖1-1）。這回路由消弧綫圈電感 L_K 和網路各相對地總電容 $(C_1+C_2+C_3)$ 串聯組成。

促使回路衰減的元件是：

a) 洩漏電導 $\left(\frac{3}{r}\right)$ ；

6) 消弧設備及它所連接的變壓器內有效損失 $\left(\frac{1}{r_0}\right)$ 。

導綫電阻損失和流經大地中電流所生的有效損失不起實際影響，因此可以不計。

作用在振盪回路上的電壓是網路的不對稱電壓 U_{nc} ，當回路的調諧值越接近共振值時，它在電感和電容上所引起的電壓越大。在消弧綫圈電感上的電壓同時亦是中性點的位移電壓 U_0 。這電壓是由對地的總電流和導納所引起的：

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_1 \left(j\omega C_1 + \frac{1}{r_1} \right) + \dot{U}_2 \left(j\omega C_2 + \frac{1}{r_2} \right) + \dot{U}_3 \left(j\omega C_3 + \frac{1}{r_3} \right)}{j\omega(C_1+C_2+C_3) - j\frac{1}{\omega L_K} + \frac{1}{r_0} + \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \right)}$$

当相电压对称及各相洩漏电導相等時中性點位移电压为:

$$\dot{U}_0 = U_{\phi} \frac{j\omega(C_1 + \alpha^2 C_2 + \alpha C_3)}{j\omega(C_1 + C_2 + C_3) - j\frac{1}{\omega L_K} + \frac{1}{R}},$$

其中 $\frac{1}{R} = \frac{1}{r_0} + \frac{3}{r}$ ——对地全电導。

中性點位移电压和相电压的比值称为中性點位移度, 即

$$\dot{u} = \frac{\dot{U}_0}{U_{\phi}} = \frac{\dot{u}_0}{\frac{\omega(C_1 + C_2 + C_3) - \frac{1}{\omega L_K}}{\omega(C_1 + C_2 + C_3) - j\frac{1}{R\omega(C_1 + C_2 + C_3)}}}.$$

分母的第一項本身就代表振盪回路的全电納和各相对地全电容电納的比值。这一項表现为在共振条件關係上的回路的脫諧度(v)。

分母的第二項是補償網路的阻尼率(d)。

因此中性點位移度可以这样表示

$$\dot{u} = \frac{\dot{u}_0}{v - jd}. \quad (1-8)$$

脫諧度可用百分比或标么值來表示。

將脫諧度公式变形, 即得:

$$U = 1 - \frac{1}{\omega L_K \cdot \omega(C_1 + C_2 + C_3)} = 1 - K, \quad (1-9)$$

其中 K ——消弧設備的調諧电感电納和網路的电容电納比——称为調諧度。

在电容电納 $\omega(C_1 + C_2 + C_3)$ 一定時电感導納 $\frac{1}{\omega L_K}$ 的变化能發生補償回路的三种运行方式:

a) $\frac{1}{\omega L_K} < \omega(C_1 + C_2 + C_3)$ ——脫諧度 v 为正值。

網路在欠補償情況下运行。当 $\frac{1}{\omega L_K} = 0$ 時脫諧度为極限值 $+1$, 亦即網路变为中性點不接地方方式运行。

$$6) \frac{1}{\omega L_K} = \omega(C_1 + C_2 + C_3) \text{——沒有脫諧現象。}$$

網路有共振的調諧值。這時有由網路的不对称电压及电導所决定的最大不对称电流流經中性點。

$$B) \frac{1}{\omega L_K} > \omega(C_1 + C_2 + C_3) \text{——脫諧度为負值。}$$

這時網路在过補償下运行。当 $\frac{1}{\omega L_K} = \infty$ 時脫諧度为極限值 $-\infty$ ，即網路轉变成中性點直接接地运行方式。在中性點上要有由各相对地电容电納不等所引起的網路不对称电流流过。

当被補償的網路形狀範圍維持不变時，变化消弧設備的調諧值就能發生所有这些运行方式。

欠補償的極限运行方式可能在中性點上接有消弧綫圈的变压器在事故断開情形下發生。

既然在電網中裝設消弧設備的補償容量通常是一有限數量，祇变化它的調諧值就不可能使脫諧度達到接近 $-\infty$ 數值。

另一方面，在电感电納 $\frac{1}{\omega L_K}$ 一定時網路电容电納 $\omega(C_1 + C_2 + C_3)$ 的变化亦顯出補償網路三种运行方式的特性：

a) $\omega(C_1 + C_2 + C_3) < \frac{1}{\omega L_K}$ ——脫諧度为負值。網路在过補償情況下运行。在採取措施降低电容电納後網路轉变到由消弧設備容量所限制的極限过補償情况。

$$6) \omega(C_1 + C_2 + C_3) = \frac{1}{\omega L_K} \text{——沒有脫諧現象；}$$

B) $\omega(C_1 + C_2 + C_3) > \frac{1}{\omega L_K}$ ——脫諧度为正值。網路在欠補償情況下运行。在採取措施增加电容电納後網路的方式接近於中性點不接地的运行方式。

宜於祇將这些在运行上实际可能的補償網路極限运行方式考慮一下。例如：

a) 由於隔离部分地區單獨运行的結果使網路的半數綫路断開；由於断綫或逐相操作所發生的逐相断開。