

全国供电技术会议文件

7

送电线路的 串联电容补偿

全国供电技术会议秘书处编

水利电力出版社

內 容 提 要

送电线路串联电容縱补偿能够提高线路的输电能力和电压水平,能够减少电压波动,已經在实践中得到証实,并已由国内一些单位取得运行上的經驗。安装串联电容器的投資費用也是比較小的。

为了介绍线路安装串联电容补偿的运行經驗,茲將張宣35千伏线路、东北鷄密綫、齐富綫和江苏馬杭桥开关室的运行总结文件整理出版,供国内各单位参考。

*

*

*

*

全国供电技术会议文件

- | | |
|---------------|------------------|
| 1. 全国供电技术会议文件 | 6. 提高供电网的运行水平 |
| 2. 线路升压 | 7. 送电线路的串联电容补偿 |
| 3. 提高开关遮断容量 | 8. “兩綫一地”制电力网的試驗 |
| 4. 提高变压器出力 | 9. 农村供电网 |
| 5. 供电网的基建設計 | |

1958

全国供电技术会议文件

7

送电线路的串联电容补偿

全国供电技术会议秘书处編

*

1290D369

水利电力出版社出版(北京西便门大街二里溝)

北京市书刊出版业营业許可証出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印 新华书店发行

*

850×1168 $\frac{1}{2}$ 开本*2 $\frac{1}{4}$ 印張*55千字

1959年1月北京第1版

1959年1月北京第1次印刷(0001—5,100册)

統一書号: 15143·1055 定价(第9类)0.29元

目 录

I、張宣35千伏送電綫安裝串聯電容器總結

北京電業管理局下花園發電廠

一、概述.....	2
二、基本原理.....	2
三、電容器的安裝地點.....	5
四、所需串聯電容器容量的計算.....	5
五、串聯電容器原理結綫.....	6
六、串聯電容器的保護.....	7
七、串聯電容器的安裝.....	10
八、運行前的試驗.....	11
九、運行情況.....	11

張宣1號綫串聯電容補償運行前的試驗（北京電管局中心試驗所）：

一、引言；二、試驗項目；三、試驗總結。

II、东北地区輸電綫路采用串聯電容縱補償運行總結

辽吉電業管理局

一、东北地区輸電綫路采用串聯電容縱補償概況.....	26
二、設計中考慮過的問題.....	29
三、施工安裝及竣工試驗.....	31
四、縱補償串聯電容的運行情況.....	33
五、总的評議及存在着的問題.....	40

III、馬杭橋開關室串聯電容器使用情況介紹

江蘇省電業管理局

一、串聯電容器在饋電綫上的應用.....	41
二、串聯電容器具體使用情況.....	44
三、結論.....	66

I. 張宣35千伏送電綫安裝串聯電容器總結

一、概 述

1957年我廠35千伏供電系統主要有二路。下花園至張家口供電綫全長近60公里，每一回路有負荷點3到4個，其中*303路的運行方式見圖1。

張家口35千伏側電壓經常在30~31千伏間，每當綫路檢修或在張家口的兩個煉鋼爐啟動時電壓變動更甚，有時不得不減少負荷。在這種情況下，為了提高張家口地區的電壓質量，提高綫路傳輸能力，決定在第三變電站安裝串聯電容器。

二、基本原理

在送電綫中接入集中容抗後，此容抗將補償綫路的感抗從而改善了綫路的運行情況，因此一般在提到串聯電容器的補償性能時往往提到補償度(或稱補償系數)。所謂補償度即接入的容抗 ω_c 與綫路感抗 ω_L 之比，用 K 來代表則

$$K = \frac{\omega_c}{\omega_L}.$$

綫路中接入串聯電容器可改變綫路常數，因之改善了綫路的運行。串聯電容器還能減少由於負荷電流變化而產生的電壓波動，同時還能取得隨着負荷的變化能夠自動的調整

電壓的特性，由於採用了串聯補償，綫路的傳輸能力增加了；由於提高了電壓，相應的綫路損失也有所降低。

現在我們來看一看最簡單的放射網路接入串聯電容補償時對

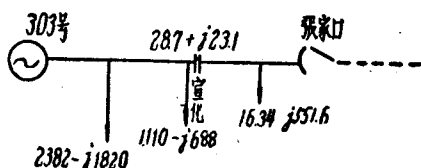


圖 1

網路运行改善的情形。图 2 为串有容抗的线路图。

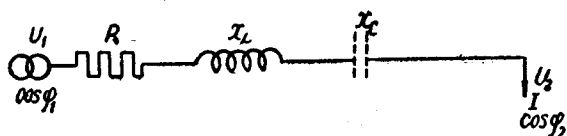


图 2 电阻为 R 、电抗为 x_L 的简单网络， x_C 为纵补偿容抗

图 3a 为无补偿时情况，从图中可见线路电压降决定于线路的 R 及 x_L 。当接入纵补偿时(图 3b) U_1 与 U_2 的差别显著的缩小

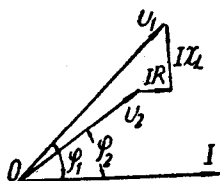


图 3a 无补偿时简单网络向量图

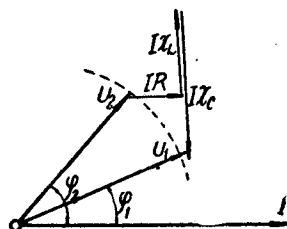


图 3b 有纵补偿时简单网络向量图

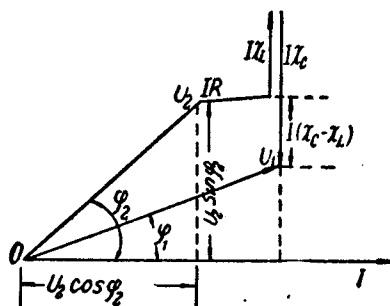


图 4 接有纵补偿网络的向量分析图

了，如选择适当的 x_C 就完全有可能使 U_2 及 U_1 的数值相等，亦即相当于线路上没有电压降，同时还改变了首端的功率因数。

从图 4 中我们能够很容易的证明接有纵补偿时的自动调压性能，为此我们只要找出负荷端电压 U_2 与负荷的关系就行了。

从图中可知

$$U_2 \cos \varphi_2 + IR = U_1 \cos \varphi_1; \quad (1)$$

$$U_2 \sin \varphi_2 - I(x_C - x_L) = U_1 \sin \varphi_1; \quad (2)$$

$$U_2 \cos \varphi_2 \times IR = 1,000 PR; \quad (3)$$

$$U_2 \sin \varphi_2 \times I(x_c - x_L) = 1,000Q(x_c - x_L). \quad (4)$$

將(1)及(2)式平方相加再以(3)、(4)式代入，最后可解出：

$$U_2 = \sqrt{\frac{S \pm \sqrt{S^2 - 4T}}{2}}, \quad (5)$$

其中：

$$S = U_1^2 - 2,000[PR - Q(x_c - x_L)];$$

$$T = [R^2 + (x_c - x_L)^2] \left(\frac{1000 \cdot P}{\cos \varphi_2} \right)^2;$$

U_1 ——送电端相电压(伏)；

Q 及 P ——受电端每相无功(千乏)及有功(瓩)负荷；

R 及 x_L ——全綫总电阻(欧)及电抗(欧)；

x_c ——所接入縱补偿容抗(欧)。

由公式(5)中我們可以計算出在綫路上接有縱补偿容抗时負荷为任一数值时的負荷端相电压。

当根据延綫电压降情况决定了电容器安裝位置后就可以决定电容器的容量了。如果电容器前面的电压为 U_1 ，今預計把电容器后面电压提高至 U_2 (图5)。綫路負荷端有視在功率 S_2 ，有功功率 P_2 ，和无功功率 Q_2 。在送电端

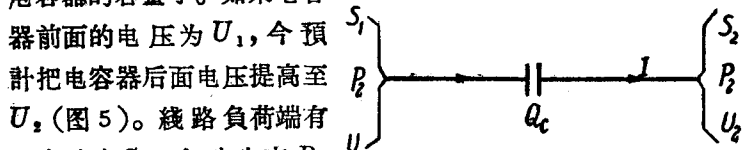


图5 綫路接有电容器时其前后的电压及負荷

有視在功率 S_1 ，有功功率

P_2 ，和无功功率 $Q_2 - Q_c$ ，其中 Q_c 为准备接入串联电容器的功率。于是可以得出

$$S_1 = \sqrt{3} U_1 I; \quad (1)$$

$$S_2 = \sqrt{3} U_2 I; \quad (2)$$

所以

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{\sqrt{P_2^2 + (Q_c - Q_2)^2}}{\sqrt{P_2^2 + Q_2^2}}. \quad (3)$$

由(3)式可求出所需串联电容器容量

$$Q_c = P_2 \left\{ \frac{Q_2}{P_2} - \sqrt{\left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 \left(1 + \left(\frac{Q_2}{P_2} \right)^2 \right)} - 1 \right\}. \quad (4)$$

三、电容器的安装地点

如果將电容器安装在綫路末端, 电容器可减少短路冲击次数, 因綫路末端发生故障的可能性是很小的。当延綫有很多負荷点时, 电容器可装在全綫电压降 $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{1}{3}$ 的地点。

考虑到电容器在运行维护上的方便及綫路电压損失情况我們决定串联电容器安装在第三变电站之出綫端。

四、所需串联电容器容量的計算

对張家口供电有二路。原設計在二路均装, 后因电容器的供应不能满足需要, 决定先在一回路上安装。根据計算將張家口电压提至33千伏需安装电容器450千乏, 每相需补偿 $x_c = 62.5$ 欧。后又考虑到补偿的经济性及变压器分头的可調性, 將末端电压提至34千伏亦足够。故补偿度由原来的 $\frac{62.5}{23.3} = 2.7$ 改为 $\frac{50}{23.3} = 2.15$, 即每相投入縱补偿容抗50欧。

現在讓我們来驗算一下当补偿度选为2.15时 (每相投入縱补偿容抗为50欧) 負荷为100%及50%时負荷端电压的变化。

当負荷为100%时負荷端电压为:

$$U_2 = \frac{\sqrt{S \pm \sqrt{S^2 - 4T}}}{\sqrt{2}},$$

其中:

$$\begin{aligned} S &= U_1^2 - 2,000[PR - Q(x_c - x_L)] \\ &= \left(\frac{35000}{3} \right)^2 - 2,000 \left(\frac{1634}{3} \times 28.7 - \frac{551.6}{3} (50 - 23.3) \right) \\ &= 37.86 \times 10^7; \end{aligned}$$

$$T = [R^2 + (x_c - x_L)^2] \left(\frac{1000 \cdot P}{\cos \varphi} \right)^2$$

$$= [21.2^2 + (50 - 23.3)^2] \left(\frac{1000 \times 828}{0.84} \right)^2 = 11 \times 10^{14}$$

將 S 、 T 值代入 U_2 式中，則得：

$$U_2 = \frac{\sqrt{38 \times 10^7 + \sqrt{(38 \times 10^7)^2 - 4 \times 11 \times 10^{14}}}}{\sqrt{2}}$$

$$= 19,700 \text{ 伏/相.}$$

綫电压 $= \sqrt{3} \times 19,700 = 34,100 \text{ 伏.}$

負荷为 50% 时 負荷側电压为：

$$U_2 = \frac{\sqrt{38 \times 10^7 + \sqrt{(38 \times 10^7)^2 - 4 \times 126 \times 10^9}}}{\sqrt{2}}$$

$$= 19,800 \text{ 伏/相.}$$

綫电压 $= \sqrt{3} \times 19,800 = 34,200 \text{ 伏.}$

可見补偿度选为 2.15 时，負荷側电压还是令人滿意的，此时所需电容器容量为：

$$Q_c = 3I^2 x_c = 3 \times 28.5^2 \times 50 = 125 \text{ 千乏.}$$

五、串联电容器原理結綫

串联与并联不同之点在于負荷电流通过前者，因此所采用的串联电容器額定电压要根据补偿度及負荷电流来考虑，也就是說所选用电容器的額定电压要大于当最大負荷电流通过电容器时与其容抗所产生的电压降。在选择容量时还要考虑到負荷的发展而有些裕度。

当时我們拥有一批瑞典 CTD-1 屋外單相 1000 伏 20 千乏电容器，对*303 路最大負荷电流为 28.5 安每相經补偿 50 欧則每条綫路串 2 台并 2 台即可，如图 6。

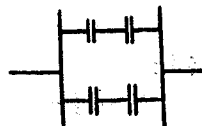


图 6

考虑到将来負荷的发展，目前实际安裝是每相串 3 并 3，如

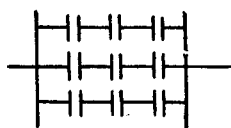


图 7。

实际安装容量为：

$$Q_c = 20(3 \times 9) = 540 \text{ 千乏。}$$

图 7

六、串联电容器的保护

对串联电容器的保护主要是防止过电压方面的保护。串联电容器是个较大的集中电容，它对周率很高的进行波具有很小的阻抗，同时串联电容器站多安装在变电站内故对大气过电压的保护一般可不考虑。

当采用两台以上的串联电容器时，其中一台损坏后其余将承受较大电压进而引起逐台击穿造成全部损坏。为防止此类事故可用横联差动保护。根据运行经验 OTD-1 型电容器在运行中很少发生故障，如果在容量不大的电容器站增装这种保护将使造价增高，运行复杂化，为了降低造价，我们决定对此种故障不加特殊保护。

现在所考虑的只是由于短路或过负荷而引起的过电压的保护。

1. 串联电容器的保护原理如图 8 所示。

2. 动作原理：

线路过负荷时（不论是线路末端发生短路或因其他原因而过负荷时），经过电容器的电流急增使其过电压，此时保护间隙击穿，保护用变流器 TT 通电，使电流继电器动作。通过中间继电器，使“消弧旁路开关 B”合闸，从而把电容器短路，解除其运行。为了更好的完成合闸动作，在合闸回路中接有“自动恢复式自保持”结线装置，待故障消除后，即线路主开关为合闸状态时，经过一定的时间使“消弧开关”断开（由时间继电器来完成），电容器从新投入运行。

3. 间隙等保护装置：我厂采用 BL 并联后再与间隙串联组成一衰减振荡回路，其主要部件情况列下：

（一）保护间隙 各相电容器额定电压 3 千伏，间隙的工频放

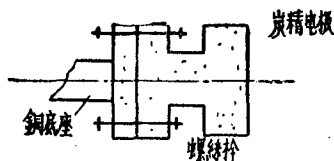


图9 放电間隙电极

电压为6千伏，其后提高为7.5千伏。間隙的电极使用炭精制成，电极形状系圓平面。开始設計时，为了增加电极散热的表面积和气体的对流在电极平面上鑽穿若干小孔。其后又取消小孔，虽經短路电流考驗电极表面并无严重燒損，电极根部的連接方法开始是將炭精加上成螺絲紋旋入銅質底座。由于电极放电时互相存在吸引力和振動，螺紋易于松动，脫扣，甚至螺杆折断，最后电极改裝成如图9断面形式。

现使用的电极直徑为60公厘，电极間距离只有4~5公厘。

保护間隙最好采用密封式，但需滿足电极放电时突然排出大量膨胀气体的要求，同时須考虑調整間隙和檢修电极的便利条件。开始使用的間隙是密封的，于放电时爆破。后改为經過 $\phi 4$ 公厘及100公厘長的管道，仍不能迅速排气，密封的玻璃罩在短路試驗时又爆炸破碎。

现时使用的間隙外壳是由 AEG 3 千伏避雷器磁外壳改裝成的。排气采用25×50公厘的活門，利用排气压力自动敞開，然后

自动关闭。排气的方向要避免电弧气体导致相間短路或接地，其構造如图10。

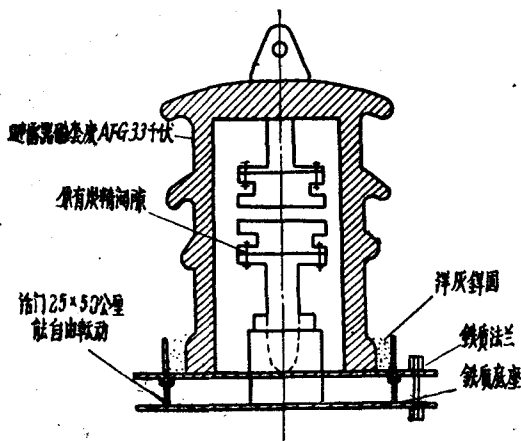


图10 張宜1号綫串联电容器放电間隙图

(二) 阻尼电抗

电阻器 当外部短路引起的过电压值超过間隙放电电压值时，間隙击穿。此时間隙通过的电流除短路电流外尚

有电容器的放电电流。为了限制此电流可接入一电阻器与放电回路串接，此时电阻的热容量很大，为了降低电阻的热容量可用 RL 衰减振荡回路与放电回路串联。

电阻器用 0.5 公厘电阻丝 4 ~ 5 股绕在胶木板上，并密封在圆筒形玻璃罩内，两端为铜质盖，电阻值约 4 欧，筒形外径约 160 公厘，长 250 公厘。

电抗器以 ϕ 6 公厘铜元绕制成直径 200 公厘的线圈 30 圈，以 3 对木质夹条固定每圈位置。如用细铜管代替铜元，电抗器重量可大为减轻，安装时为了节省地位电阻器安置在电抗器内。

(三)变流器 变流器与保护间隙串接，当间隙放电后方通过电流，而起动电流继电器使油开关合闸达到间隙灭弧的目的，考虑到起动电流有可能瞬间回复到正常电流。为了保证油开关合闸，变流比尽可能减少。现用变流器为 50/5A 电流继电器起动值 1.5 安，即一次起动电流 15 安，少于最低负荷电流值。

最初安装时仅两侧各装一变流器，运行经验证明三相电流不平衡时有可能仅中相间隙放电。由于中相没有保护动作装置，会导致中相间隙长时间通电而损坏，因此中相又增设保护装置。

七、串联电容器的安装

串联电容器及其保护间隙，短接油开关，短接刀闸等整组的结线很复杂。如采用横布置，势将占面积很大，前后须安装母线，故设计中采用垂直布置。短接刀闸安装在架构顶部，电容器及其保护间隙，阻尼电抗电阻分相安装在三个 35 千伏等级的绝缘台上。绝缘台并排在架构中间横梁上，绝缘台边缘互相间距离及对铁构距离仅保持 400 公厘，以缩短横梁长度减少横梁内应力。

本架构全部使用铁构，因施工期间已进入冬季，且施工时间短。今后设计时应改用钢筋混凝土柱或木桩，以节约较多钢材。

各相电容器、保护间隙、阻尼电抗电阻安装在同一绝缘台上，相互间最小距离按 3 千伏等级处理，隔离使用的绝缘子亦为 3 千伏等级。

八、运行前的試驗

見“張宜 1 号綫串联电容补偿运行前的試驗”（北京电业管理局中心試驗所）。

九、运行情况

根据压降公式 $\Delta U = \frac{PR + Q(x_L - x_c)}{U}$ 可看出，綫路負荷

无功功率不能过小，如在負荷端安裝补偿无功功率的电容器便会显著降低串联电容器的效用。采用过补偿时（即 $x_c > x_L$ ）可使綫路电压降为零，甚至达到負的电压降。

此次串联电容器投入运行的目的側重于取得安全运行的經驗。綫路全部負荷仅有一个 1.5 吨及一个 1 吨容量的电弧鋼炉。鋼炉的負荷特点是負荷电流波动較大。电容器投入运行前后 3.3 千伏側母綫电压及电压波动范围变化情况見表 1。

表 1

补 偿 情 况	3.3 千伏側母綫的电压, 千伏	3.3 千伏側母綫电压波动范围
无 补 偿	2.9~3.1	15.5%~8%
全 补 偿	3.2~3.3	6.6%~3.8%
提 高 值	0.2~0.3	8.9%~4.2%

当电弧炉起动操作不当时，起动电流特大，自 10 月 1 日运行以后保护間隙每日皆动作，次数由 1 次至 5 次，到 10 月 28 日止动作次数达 50 次。間隙动作后，短接油开关 0.465 秒后合閘，再經 3 秒后自动恢复原状，但有时起动电流迅速下降，時間短于油开关合閘時間故开关不合閘，因中間繼电器延时只保持 0.3 秒。根据运行經驗看来間隙在 15 安培以下是能自动消弧的，但这与电容器的电抗大小有关，現每相电容器电抗为 50 欧。間隙自消弧后的端电压在 750 伏以下，噴出的电弧及爆裂声日間在数十公尺远处亦可发觉，間隙自减弧占全部动作次数約近半数，虽然遮断容量在允許

範圍內，但動作次數過多。擬提高間隙放電電壓至7000伏，以減少動作次數。

油開關合閘時間過長，還有待今後在停電時間內作調整及改進，使合閘時間少於0.3秒方能夠與中間繼電延時自保持配合，並克服上述缺點。對油開關遮斷容量要求遠低於定額，可以考慮縮短油開關行程而達到這點。

1958年11月14日

張宣1號線串聯電容補償運行前的試驗

一、引 言

由下花園35千伏系統供電張家口，線路長達50多公里；中途多較重負荷的分支線；且末端系鋼爐用戶，起動時負荷變動很大，引起電壓急劇波動；就是平時也嫌電壓水平不夠；特別是線路上還存在着輸送潛力，若增加輸送容量時，更增加到終端的電壓損失；為此下花園電廠在張宣1號線路上，選擇宣化變電所出口處，裝設串聯電容補償，所用電容器為CTD-1型（瑞典出品），每只容量20千乏，電壓1,000伏，容抗50歐，每相由三列的串聯三個電容器組所組成，補償度為 $2.1 \left(\frac{x_c}{x_L} = \frac{50}{23.75} \right)$ 。

串聯電容補償工作裝置完竣後，在投入運行前，為了了解其補償效果和裝置中保護部分所起的作用，特根據系統情況、用戶性質和運行中可能發生的故障，擬出了幾項試驗項目；曾於今年3月12日～3月25日期間，先後進行過無負荷送電、帶負荷331開關（主開關）重合閘與031開關（電容器旁路開關）合跳閘，在不同補償度下起動鋼爐，無補償與全補償時單相接地等試驗，試驗至此，放電間隙的玻璃外殼發生破裂，才停止了進行；俟放電間隙作一些改進，並在中相放電間隙回路上補裝了變流器，保護電容器過電壓的系統，算是恢復完妥後，復於9月5日補做了三相短路試驗。

現將試驗結果，整理編寫于后。

二、試驗項目

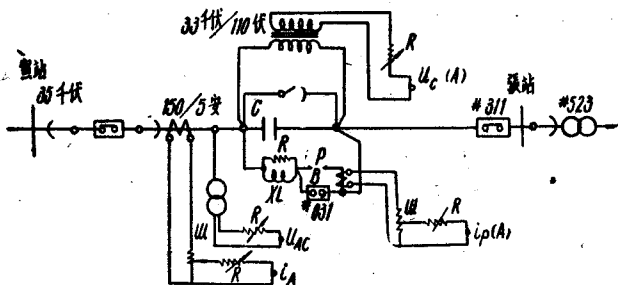
1. 无負荷全电容补偿送电試驗

(一) 試驗目的：

为了寻求綫路經串联全电容补偿后，当終端帶上空載变压器而送电时，是否存在鉄諧振現象及其严重性。

(二) 試驗結綫与要求：

(1) 試驗結綫單綫示意图見結綫图1。



結綫图 1

(2) 試驗要求摘要：

先在負荷側帶上空載的2,400千伏安变压器，这时031旁路开关在拉開情况(即电容器已处于准备投入运行状态下)，再由331主开关合拉数次对綫路送电。

(三) 从录波中所测量的数据：

(四) 試驗結果：

(1) 由331主开关对綫路和空載变压器充电合閘的試驗結果来看，鉄諧振电流都在2倍或3倍的2,400千伏安变压器滿負荷时的高压側額定电流以上；因空載充电电流大小与合閘电压瞬間相位有关，其上限可能会达到什么范围，还有待于今后其他方面相同性質的試驗資料来补充。

不过所发生的鉄諧振电流，經18个周波就消失；合閘与断开

表 1

被 試 項	次 序	最 大 值	對 額 定 值 之 比	持 續 時 間
綫間電壓	1	35,750伏	1.02倍	—
u_{Ac}	2	35,750伏	1.02倍	—
綫電流	1	144安	3.43倍	0.375秒
i_0	2	144安	3.43倍	0.360秒
電容器端電壓	1	8,950伏	2.98倍	0.01 秒
$u_c(A)$	2	9,950伏	3.32倍	0.006秒

說明：1. 綫路額定電流以# 523變壓器高壓側的電流值為準，

$$I_N = \frac{2400}{\sqrt{3} \cdot 33} = 42 \text{ 安.}$$

2. 電容器端電壓額定值以3,000伏為準。

瞬間綫路並未出現異常情況。

(2) 空載充電電流過大，會引起電容器兩端過電壓超過 $3U_{OH}$ (即 $3 \times 3,000$ 伏)，但亦只有經過半個周波以內的時間，就被間隙放電所短接，錄波照片上的 i_p 直綫有跳躍斷裂形迹可以証實這一點。同時 031 旁路開關亦曾經動作過，對電容器尚不至有危險。

(3) 在今後運行中，遇到對綫路帶空載變壓器送電時，其操作程序應為：先由 311 開關帶上空載變壓器，031 旁路開關在合閘狀態下，經過331主開關合閘後再拉開031旁路開關，才算完成空載送電操作；這樣會緩和充電電流。運行人員應遵守這樣程序，就可以避免間隙放電與 031 旁路開關動作次數的頻繁。

2. 在無補償和全補償下帶負荷主開關重合閘與旁路開關合跳閘試驗

(一) 試驗目的：

為了探討綫路上帶正常負荷，經全電容串聯補償後，331 主開關自動重合閘所引起綫電壓綫電流和電容器端電壓的瞬變過程，特進行本項試驗，以便與無電容串聯補償情況下，331 主開關自動重合閘相比較。

此外,为了了解电容器运行在正常负荷时,瞬間被分路所短接而又立即恢复运行这一过程,綫路上的瞬变状况,进行了 031 旁路开关“合跳開”試驗。

(二)試驗結綫与要求:

(1)試驗結綫——參看試驗一結綫图 1。

(2)試驗要求摘要:

綫路終端帶上两个鋼炉,在正常运行情况下,串联电容器当不投入运行与投入运行时进行 331 主开关自动重合開;繼之 031 旁路开关合跳開数次。

(三)从录波中所测量的数据:

(1)帶負荷 331 主开关自动重合開

表 2

补偿情况	重合開時間 秒	被測項	最大电流,安(端电压伏)		最大值与負荷值 (或額定值)之比	瞬变時間 秒
			合開瞬間	瞬变过程		
无补偿	0.91	i_c	48.8	—	1.625	0.16
		i_A	72	—	2.400	0.20
全补偿	0.89	i_c	37.5	97.5	3.250	0.22
		i_A	136.5	—	4.550	0.24
		$u_c(\Delta)$	—	1960	0.654	0.26

說明: 1. 无补偿与全补偿时負荷电流为 30 安。

2. 电容器端电压 $u_c(\Delta)$ 以 3000 伏为額定值。

3. 全补偿帶負荷 331 主开关跳開后, 电容器放电时间为 0.13 秒。

(2)帶負荷 031 旁路开关合跳開。

(四)試驗結果:

(1)帶負荷 331 主开关自动重合開, 在合開瞬間电流瞬間值决定于該相电压的初相位:

全电容补偿比无电容补偿, 331 主开关自动重合開时电流瞬变过程波形较为复杂, 根据架空网络的特点 $R_0 < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, 回路內电