

配 电 网 絡 中 的 串 联 补 偿 装 置

曹、榮、江 編 著

中 国 工 业 出 版 社

本书叙述用于配电网中的串联补偿电容器装置，分析它的运行条件、保护方式、调压效果及提高线路输电能力的作用，列举了一些必要的计算公式及算例。其中关于保护回路元件的要求原则与计算公式，同样适用于超高压线路的串联补偿装置。

本书系作者根据几年来搜集的有关文献资料，综合阐述配电网中采用串联补偿装置的若干问题。可供有关设计、运行单位的工程技术人员阅读，对高、中等院校有关专业的师生也有参考价值。

本书编写过程中，毛鈞濂、甘澄泽、陈干周、王义基、薛卫、沙察民、方思立、陈天祥、马崇兴等同志曾对原稿个别部分进行了审改，并对某些公式的推导提供了帮助。

配电网中的串联补偿装置

曹荣江 编著

★

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南营房)

中国工业出版社出版(北京修门内路四十四号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

★

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $3^{3/4}$ ·字数79,000

1964年12月北京第一版·1964年12月北京第一次印刷

印数0001—10,220·定价(科六)0.48元

★

统一书号: 15165·3526(水电-459)

目 录

第一节	引言	1
第二节	采用串联补偿装置改善配电线路末端电压质量与采用并联补偿方案的比较	5
第三节	采用串联补偿装置对增加系统无功功率的效果, 无功功率对补偿效果的影响	10
第四节	关于线路损失	14
第五节	串联补偿装置与并联补偿装置对改善线路始端功率因数的比较	16
第六节	如何决定串联补偿装置电容器的容量, 配电网络的电气计算举例	19
第七节	串联补偿电容器在配电网络中的安装位置	27
第八节	在配电线路的短路过程中串联补偿电容器上暂态过电压的计算	29
第九节	配电网络中的串联补偿电容器对过电压的保护	36
第十节	串联补偿电容器与并联补偿电容器(即余弦电容器)在技术要求上的差异	57
第十一节	串联补偿装置在网络中引起的铁磁谐振现象	65
第十二节	感应电动机在装有串联补偿装置的线路上 的起动过程及其自励磁区域的分析	67
第十三节	串联补偿装置在投入运行前的试验项目	85
第十四节	设计串联补偿装置的程序	88

IV

附录1	配电网中采用串联补偿装置的情况简介	90
附录2	CY-0.6-50-1型串联补偿电容器使用貯藏运输 说明书(摘要)	94
附录3	架空线路的阻抗参数值	99
附录4	电力电容器和耦合电容器的试验项目、周期和 标准	103
附录5	在配电网中采用串联补偿装置调节电压水平 的某些问题(摘译自有关资料)	104
参考文献		114

第一节 引 言

串联补偿电容器装置是近年来逐渐得到推广的电力技术之一。利用串联在綫路上的电容器組形成的集中性电容阻抗，补偿綫路上的分布性电感阻抗，可以达到增加綫路輸送容量，改善配电电压质量，改善并联各綫路間的負荷分布情况以降低总綫損等目的。

設配电綫路的参数为 $R + jX_L$ (欧/每相)，綫路电流为 $\dot{I}$ (安)，則沿綫压降为 $\dot{I}(R + jX_L)$ 伏。如果配电綫路过长，綫路感抗 X_L 甚大，压降过大，則会使末端电压水平过低。在采用串联补偿电容器后，設每相接入的电容器容抗为 $-jX_C$ (欧)，則压降为 $\dot{I}[R + j(X_L - X_C)]$ 。由于綫路感抗 X_L 及电容器容抗 X_C 互相抵消，从而降低了电压損失，达到提高末端电压水平的目的。

串联补偿装置按其效果可分为两类：在220千伏（或110千伏）及更高电压等級的系統中常用以提高綫路輸送容量，提高系統的动、靜稳定度，合理分布并联綫路間負荷等。其补偿度 K 一般約为 0.15~0.6 左右，这是由它的使用目的及經濟上的原因所决定的；在60~110千伏（或220千伏）及以下的网络中常用以改善綫路的电压水平，提高配电网的輸送能力。在一定的輸送功率下，因綫路电压水平的提高而降低了全电流值，从而降低了綫損，能获得相当高的經濟效益。配电网中的电阻值 R 較大，甚至有时超过其电感阻抗值 X_L 。为了对电阻 R 形成的压降也进行适当的补偿，配电网中串联补偿电容器的补偿度多接近于1，或大于1，一

一般在1~4之間。

这里对补偿度 K 的含义提供一点意見。

所謂补偿度 K 系指电容阻抗对沿綫分布性电感阻抗的补偿程度，因此，一般地命

$$K = \frac{\text{串联补偿装置的每相电容电抗 (欧)}}{\text{每相沿线分布性电感电抗值 (欧)}} = \frac{X_C}{X_L}.$$

K 值也可以用%表示。

應該注明，按照这个定义， X_L 中并不包括电机及变压器的感抗。

补偿度 K 值可在一定程度上代表串联补偿装置的运行特性。作者认为在配电网中的 K 值在1.5~2以上时，可理解为高补偿度；在1~1.5时，可理解为中补偿度；在0.5上下时，可理解为低补偿度。例如，在高补偿度下，可能产生感应电动机在起动过程中的自励磁现象和綫路的鉄磁諧振现象等。从 K 值又可以大致估計串联电容器的容量和綫路在补偿前的运行特性等。

既然 K 值系表明补偿特性的数据， K 值中的 X_L 数值的計算方法可以按照不同的具体情况而有不同的理解，但应以能恰当的表明該补偿装置的运行特性为宜。

例如在沿綫沒有分支綫的情况下， X_L 当然系指綫路首末两端間的綫路总感抗。

如果綫路全部系分散性的較小負荷， X_L 的含义仍与上同。

又例如綫路上有若干負荷点1、2、3、4等（图1），其中以負荷1为最大，居主要地位，則在計算 K 值中的 X_L 时，以取 X_{0-1} 值为宜，不应取为 X_{0-4} 或其他。因为只有这样才能表明串联补偿装置的特性数据，表明它对这条綫路上主要

負荷的影响。这时候，2、3、4各点的負荷均被看成是1处的附加負荷。

很明显， X_L 中的数值更不应將負荷感抗也計算在內。

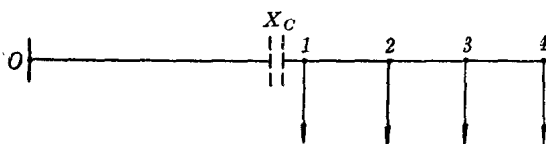


图 1 配电网单相示意图

鉴于現場在計算补偿度时各有取舍，难于从补偿度大致估計其运行特性，所以謹作如上的說明。

由于安装串联补偿装置的目的不同，补偿度不同，容量各異，因而所引起的問題也不全一样。关于超高压系統中的串联补偿装置不在本书討論范围之內（參閱文献5、6、7），以下仅对用于配电网中的串联补偿电容器的若干問題加以分析闡述。

多次的計算表明，采用串联补偿电容器以改善綫路末端电压质量，比为了同一目的而采用并联补偿更为經濟。为达到同一調压效果，采用串联补偿所需的电容器容量仅为并联补偿方案的 $\frac{1}{2}$ ，或更少。串联补偿电容器不經常承受额定电压，因而持續性的电能損失甚低于并联补偿电容器中的損失。

利用串联补偿进行調压及增加网络輸送能力，一般說来与綫路电感电抗 X_L 、綫路电阻 R 及功率因数 $\cos\varphi$ 有关；当 $\frac{X_L}{R} > 1$ 及 $\cos\varphi < 0.9$ 时，效果特別显著；当 $1 > \frac{X_L}{R} \geq 0.6$ ， $\cos\varphi \leq 0.7$ 时，串联补偿也能获得相当的效果；甚至当

$\frac{X_L}{R} \geq 2$, $\cos\varphi=0.9\sim 0.95$ 时, 也能起到一定的作用。由此

可見, 功率因数愈低, 效果愈大。当导綫 $\frac{X_L}{R}$ 之值愈大时, 效果也愈显著。这意味着当綫路截面具有裕度时, 效果显著。目前我国农村配电网中, 由于輸送距离甚远, 功率因数低, 故綫路末端电压水平过低。在一些地区, 沒有考虑綫損的百分比, 送电成本較高; 采用串联补偿装置提高电压水平并降低綫損, 将起到一定的积极作用。

串联补偿的电容性电抗所起的調压作用, 与通过其中的綫路电流成正比关系。当綫路电流較大时, 綫路压降增加, 綫路末端电压水平下降。与此同时, 因电流的增加, 补偿效果显著, 电容器上增大的电压上升程度正好与电感电抗上加大的压降相补偿, 因而串联补偿装置有自行按需要調整末端电压的特点。这是任何其他調压方式所不能及的优点。

用于串联补偿所需的电容器无功容量几乎全部再现于系統末端, 沒有过多的損失。

根据1958年鞍山全国供电技术会議上的若干技术文件, 当时对国内建立的几个串联补偿装置所进行的技术經濟比較表明, 与为了同一目的而采用升压变压器、更換导綫等的費用相比較, 采用串联补偿更为經濟。

近年来, 配电网中的串联补偿在日本、瑞典和苏联等国得到更多的发展。

采用串联补偿装置也带来一些特殊問題, 如过电压保护問題, 与空載变压器特性参数配合下的鉄磁諧振問題, 以及在补偿度較大情况下起动感应电动机时的異常現象等。不論怎样, 串联补偿装置在配电网中的优良調压作用已得到大

家一致的公認。許多技術問題已為人們所掌握，一些特殊現象也有足夠的方法加以避免，因此，串聯補償近年來已逐步得到推廣。

第二節 採用串聯補償裝置改善配電線路末端電壓質量與採用並聯補償方案的比較

隨著網絡負荷的日益增加，在某些地區由於配電線路（通常系指66~35千伏及以下電壓等級的線路）輸送距離較遠，輸送能力不足，線路受端壓降較大，不能保證必需的電壓水平，影響正常供電。由於電壓水平低，所需電流大，線損率極高。為了提高受端電壓水平，增加網絡中的無功功率（後者是主要目的），一般常採用並聯補償的余弦電容器。以下試圖證明，採用串聯補償裝置也可以供給網絡以無功功率，而且它的調壓效果較並聯補償裝置更為顯著（請注意，在進行比較時，必須同時考慮到線損的變化及這兩種補償方式附加設備費用的投資）。

將配電線路簡化後，其等值圖如圖2所示，其中 R 是線路電阻（歐）， X_L 是線路部分總感抗值（歐）， X_C 是串聯補償裝置的電容性電抗值（歐）， X'_C 是並聯補償裝置的電容性電抗值（歐）， $\dot{U}_1$ 及 $\dot{U}_2$ 是線路首、末兩端的相電壓（千伏有效值）， $\dot{I}_1$ 及 $\dot{I}_2$ 是線路首、末兩端線電流（千安有效值）。負荷側總功率 $\dot{W}_2 = P - jQ$ ，其中 $\dot{W}_2$ 、 P 、 Q 的單位均以每相兆伏安表示。功率因數角 $\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{Q}{P}$ ，每相沿線壓降

$$|\Delta \dot{U}| = |\dot{U}_1| - |\dot{U}_2|。$$

在对两种調压方案进行比较时，作如下的假设：

- (1) 沿綫电压降落的绝对值彼此相等；
- (2) 綫路末端的电压绝对值彼此相同。

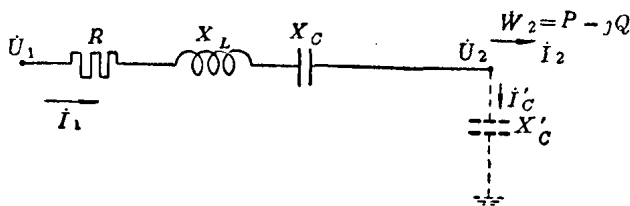


图 2 具有串联 X_c 或并联 X'_c 补偿装置的配电网络单相示意图

如图 2 所示，当采用串联补偿电容器 X_c 时，可得下列电压降落的公式：

$$\begin{aligned} |\Delta \dot{U}| &= |\dot{U}_1| - |\dot{U}_2| \\ &= |\{\dot{U}_2 + \dot{I}_1 [R + j(X_L - X_c)]\}| - |\dot{U}_2|. \end{aligned}$$

今取 $\dot{U}_2$ 作为时间座标轴的基准，即 X 轴，则 $|\dot{U}_2| = U_2$ 。将 $\dot{I}_1 = \dot{W}_2 / \dot{U}_2^* = (P - jQ) / U_2$ 代入上式，并忽略电压降落中的垂直分量，则经过简化后可得：

$$|\Delta \dot{U}_2| \approx \frac{PR + Q(X_L - X_c)}{U_2}. \quad (1)$$

当采用并联电容器 X'_c 以达到上述同一目的时，用同样的方法处理，可得出表示压降 $|\Delta \dot{U}'|$ 的算式如下：

$$\begin{aligned} |\Delta \dot{U}'| &= |\dot{U}_1| - |\dot{U}_2| \\ &= |\dot{U}_2 + (\dot{I}_1 + \dot{I}_c)(R + jX_L)| - |\dot{U}_2|. \end{aligned}$$

同前面一样，取 $\dot{U}_2$ 为 X 轴，代入 $\dot{I}_c = \dot{U}_2 / -jX'_c$ ，其中 $X'_c = \frac{1}{\omega c'}$ 。在换算中也将垂直分量略去不计，最后可得：

$$|\Delta \dot{U}'| = \frac{PR}{U_2} - X_L \left(\frac{U_2}{X'_C} - \frac{Q}{U_2} \right). \quad (2)$$

由于目的在于比較上述两种方案的調压效果，故設它們的調压效果相等，即 $|\Delta \dot{U}| = |\Delta \dot{U}'|$ ，亦即（1）式等于（2）式。这样，簡化后可得：

$$\frac{QX_C}{U_2} = \frac{U_2 X_L}{X'_C}. \quad (3)$$

設串联补偿的三相电容器功率为 $Q'_{串}$ ，并联补偿电容器的三相功率为 $Q_{并}$ ，并以兆乏表示，則得：

$$\frac{1}{3} Q'_{串} = \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} \cdot X_C, \quad \frac{1}{3} Q_{并} = \frac{U_2^2}{X'_C}.$$

再設串联补偿电容器在运行中所承受的額定压降为 U'_{c_n} ，电容器組本身的額定电压为 U_{c_n} ，命 $k = U_{c_n}/U'_{c_n} > 1$ （表示在設備运行中的裕度），則串联补偿电容器的三相安装容量为 $Q_{串} = k^2 Q'_{串}$ 。

对上列各式引用（3）式的关系后，经过換算可得：

$$\alpha = \frac{Q_{并}}{Q_{串}} = \frac{U_2^2 \sin \varphi}{k^2 |\dot{W}_2| X_L}. \quad (4)$$

上式表明，并联补偿与串联补偿所需电容器容量之比（在相同的調压效果时）与功率因数角 φ 、末端相电压水平 U_2 、每相传输的全功率 $|\dot{W}_2|$ 及綫路感抗值 X_L 有关。如果 α 值大于 1，即 $Q_{并} > Q_{串}$ ，这表示采用串联补偿所需的电容器較少；如果 α 值小于 1，即 $Q_{并} < Q_{串}$ ，則采用并联补偿所需的电容器較少。再将附加費用考虑在內，从而可决定何种方案为經濟。

● 本文推导的公式与苏联 И. Э. Ибрагимов 于 1957 年所推出的公式相一致。

对于各级配电电压的线路可根据(4)式得出较简单的计算公式及曲线,以备计算时查阅。其方法如下(其中均设 $k=1.2$):

对于6千伏电压等级的线路可得:

$$a = 8.33 \frac{\sin \varphi}{|\dot{W}_2| X_L}; \quad (5)$$

对于10千伏电压等级的线路可得:

$$a = 23.2 \frac{\sin \varphi}{|\dot{W}_2| X_L}; \quad (6)$$

对于22千伏电压等级的线路可得:

$$a = 112 \frac{\sin \varphi}{|\dot{W}_2| X_L}; \quad (7)$$

对于35千伏电压等级的线路可得:

$$a = 284 \frac{\sin \varphi}{|\dot{W}_2| X_L}. \quad (8)$$

在实例计算中,当功率因数在0.95、0.9、0.8、0.7、0.6的范围内变化时,相应的 $\sin \varphi$ 值各为0.314、0.44、0.6、0.718、0.8。线路感抗值变化在2~30欧之间,每相输送功率变化在数百至15,000千伏安之间。根据各级电压线路的一般情况及(5)~(8)式可作出图3中的各组曲线。曲线的用法如下:当知道某一线路长度后,计算出 X_L 值(附录3),并乘以每相输送容量 $|\dot{W}_2|$,然后根据不同的 $\cos \varphi$ 值自图3的相应曲线上查出对应的 $\frac{\sin \varphi}{|\dot{W}_2| X_L}$ 值。再根据线路的电压等级乘以相应的系数即可求出 a 值。如果 a 值大于1,表示采用串联补偿将少用一些电容器。此外,尚应考虑线损的变化、设备条件等其他因素。今举例如下:

(1)某35千伏线路,三相输送容量13兆伏安, $X_L =$

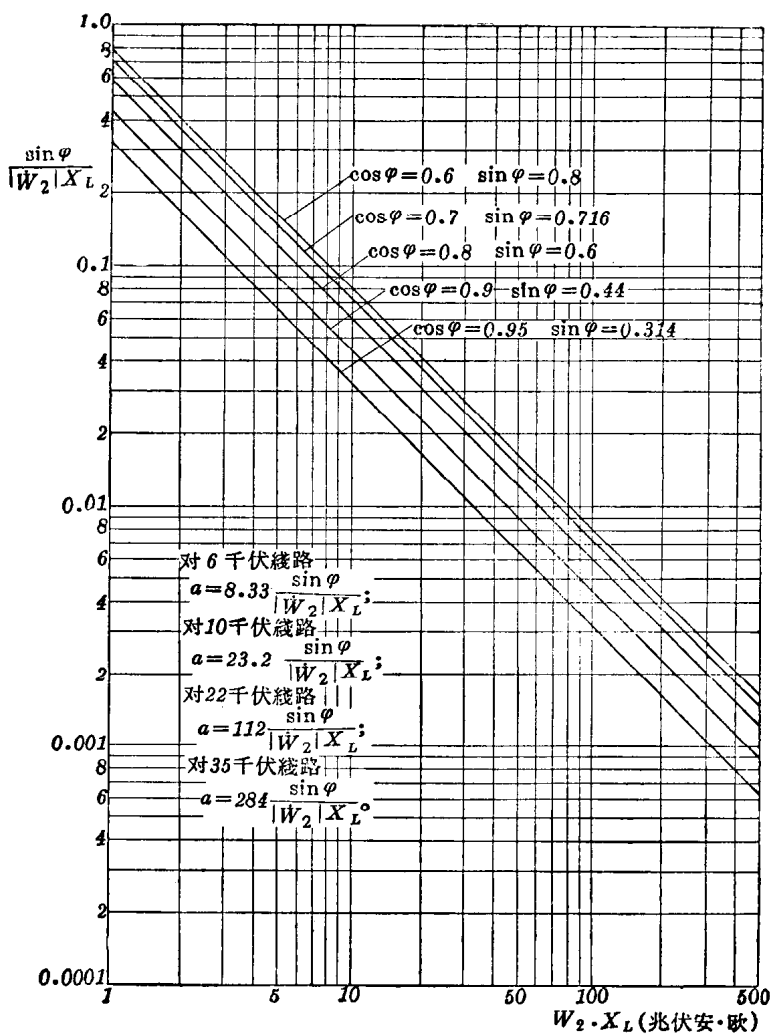


图 3 公式 (5) ~ (8) 的计算曲线

24.4 欧，則 $|W_2| X_L = 105.8$ 。設 $\cos\varphi = 0.8$ ，由图 3 可得 $a = 284 \times 0.0054 = 1.54 > 1$ ，这表明，采用串联补偿达到同一調压效果时，將較并联补偿方案节省約 50% 的电容器；

(2) 某 22 千伏綫路，三相輸送容量 1.79 兆伏安， $X_L = 32.3$ 欧，則 $|W_2| X_L = 19.3$ 。設 $\cos\varphi = 0.8$ ，由图 3 可得 $a = 112 \times 0.03 = 3.36 > 1$ ，即約可节省三倍的电容器；

(3) 某 6 千伏綫路，三相輸送容量 2 兆伏安，綫长 5.85 公里， $X_L = 2.07$ 欧， $\cos\varphi = 0.8$ ，查得 $a = 8.33 \times 0.4 = 3.33 > 1$ ，效果与前例同；

(4) 某 6 千伏农电綫路，长 12 公里， $X_L = 4.5$ 欧， $\cos\varphi = 0.8$ ，三相輸送容量 2.08 兆伏安，則 $|W_2| X_L = 3.12$ ，查曲綫可得 $a = 8.33 \times 0.19 = 1.58 > 1$ 。

綜上述可知，为了調压，提高綫路末端电压水平，在多数情况下采用串联补偿装置有极大的經濟意义。

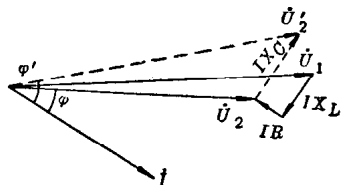
第三节 采用串联补偿装置对增加系統无功功率的效果，无功功率对补偿效果的影响^①

在配电网中感到无功功率不足及电压过低时，如为了提高綫路受端的电压水平，將本可用于并联补偿的无功容量改为串联补偿，則此时电容器的无功容量是否能再現于負荷一方，需要加以說明。

利用向量图 4 來說明安装串联补偿装置对网络无功的影

^① 本节目的在于說明串联补偿装置的无功容量对系統功率平衡的关系。关于綫路負荷特性在电压提高后的变化（即負荷一方有功及无功与电压的关系）不在本文討論范围之内。

响。如果以配电线路始端参数为不变值，根据图 4，设始端电压为 $\dot{U}_1$ ，经过电感及电阻压降后可得末端电压为 $\dot{U}_2$ ，功率因数角为 φ ；加装串联补偿后的末端电压提高为 $\dot{U}'_2$ ，功率因数角增为 φ' ，则末端无功功率将有所增加。



以下用计算说明串联补偿装置对末端无功功率的影响，并与并联补偿方案作一比较。

图 4 当线路始端参数为固定值时，串联补偿对末端参数影响的向量图

在配电网末端加装并联补偿电容器后，使末端获得的无功功率等于电容器的安装容量，这一点大家都很清楚，不必赘述。

如果采用串联补偿，末端无功功率的变化情况如下。在推导中均假定始端电压及功率为一定数值^①。

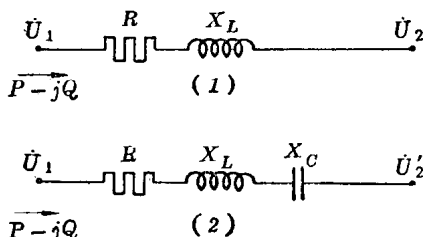


图 5 比较无功功率变化情况的配电网单相示意图

根据图 5 (1)，
网络末端的功率（以 $\dot{U}_1$ 为 X 轴）为：

^① 水利电力部技术改进局毛鈞廉工程师认为，在比较无功的变化时，当加装串联补偿后线路末端电压抬高，如果考虑以电动机负荷为主要负荷，则有功功率的变化不大，无功功率按标么值计算的上升率为电压按标么值增加率的 3 倍。因此，在比较时应按末端有功不变、无功按一定比例上升、始端电压不变等条件进行分析。这里为了说明串联补偿无功的去向，且为了简化计算，暂以此为例作为说明。

$$\dot{W}_2 = \frac{P - jQ}{U_1^*} \dot{U}_2 = (P - jQ) - \frac{(P - jQ)^2}{U_1^2} (R + jX_L). \quad (9)$$

在图 5 (2) 中, 网络末端的功率为,

$$\begin{aligned} \dot{W}'_2 &= \frac{P - jQ}{U_1^*} \dot{U}'_2 = (P - jQ) \\ &\quad - \frac{(P - jQ)^2}{U_1^2} [R + j(X_L - X_C)]. \quad (10) \end{aligned}$$

根据 (9)、(10) 两式, 末端功率在加装串联补偿前后的变化为:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{W} &= \dot{W}'_2 - \dot{W}_2 = j \frac{(P - jQ)^2}{U_1^2} X_C = j \dot{I}_1^2 X_C \\ &= j \dot{I}_1 \dot{U}_{cu}, \quad (11) \end{aligned}$$

式中 $|\dot{U}_{cu}| = |\dot{I}_1| X_C$ ——串联补偿电容器上所承受的实际电压。

由 (11) 式可知, 用于串联补偿装置上的电容器的无功功率全部出现于末端, 亦即其效果与并联补偿是一样的。但由于通过线路的无功容量增大, 因而线损略有增加 (与并联补偿时的线损相比较而言)。

必须指出, 串联补偿装置对末端无功的贡献将与通过电容器的电流值成正比。在以上推导中均假设线路输送容量为额定值。如果输送功率下降, 则串联补偿装置在末端产生的无功功率将成正比例的下降。

根据 (1) 式可以分析线路无功功率对调压效果的影响。在表示线路压降的 (1) 式中, 线路压降与 $Q(X_L - X_C)$ 有关。当 $X_L = X_C$, 即补偿度 $K = 1$ 时, 无功功率 Q 对 $|\dot{U}_2|$ 不发生影响。当 $K < 1$, 即 $X_L > X_C$ 时, $X_L - X_C$ 为

正值，則 Q 愈大时， $|4\dot{U}_2|$ 也越大。綫路特性与一般无补偿时的情况一样。但在配电网中通常总是 $K > 1$ ，即 $X_c > X_L$ ，此时 $(X_L - X_c)$ 为負值， Q 越大，則 $|4\dot{U}_2|$ 之值下降，甚至成为負数，即成为电压升，亦即通过串联补偿（当 $K > 1$ 时）的无功功率对調压效果起着很大的作用。如果 $K > 1$ ，即在过补偿情况下，但末端有足够的并联补偿装置供給无功，因而綫路上的无功 Q 值甚低，則 $Q(X_L - X_c)$ 所引起的电压升也很有限。当 $Q = 0$ 时，串联补偿装置的調压效果趋于消失。

根据某地同志1961年的試驗，得出下列数据：在某綫路上測得 $K = 1.44$ ，其串联补偿电容器的調压效果与通过电容器的功率因数有表1所示的关系。

表 1

运 行 方 式	輸送容量 (千瓦)	綫路电流 (安有效值)	功率因数 ($\cos\varphi$)	电 压 提 高 效 果 (%)
在末端有并联补偿时投入 串联补偿	1500~1520	39	0.765~0.77	8.9~9.1
在末端切除并联补偿时投入 串联补偿	1730~1880	48~52.8	0.725~0.707	15.4~16.8

由表1可明显看出功率因数对調压效果的影响。

日本1959年，“电力”杂志中，北陆电力株式会社的6千伏串联补偿报告中也提到同一现象。在送端为6.9千伏，綫路参数为 $z = 5.364 + j4.534 - j10$ （欧）的情况下，可得到图6中的曲綫（当时負荷电流以60安有效值为标准）。

因此，在設有 $K > 1$ 的串联补偿装置的綫路上，希望通过綫路的无功越大越好，并联补偿将大大降低串联补偿的調压效果。但是，为了調压而全部拆除末端的并联补偿，使全