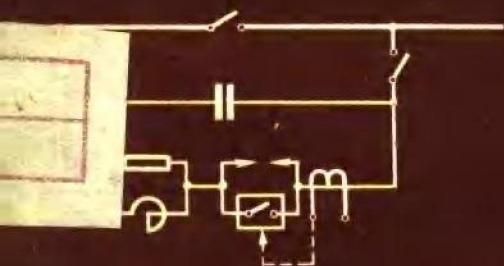


串联电容补偿装置 在 电力系统中的应用

浙江省电力中心试验所高压试验组 编
浙江大学发电教研组



内 容 提 要

本书叙述了串联电容补偿装置在电力系统中对改善电压质量、改善电网功率分布、提高输电线送电容量的作用；介绍了串联电容补偿装置的设计原则及主要设备；归纳和分析了我国串联电容补偿装置在实际运行中出现的一些问题及其解决办法。

本书供有关专业工人及技术人员参考。

串联电容补偿装置在电力系统中的应用

浙江省电力中心试验所高压试验组 编
浙 江 大 学 发 电 教 研 组

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

1977年5月北京第一版

1977年5月北京第一次印刷

印数 00001—16340 册 每册 0.38 元

书号 15143·3218

目 录

序 言	1
第一章 串联电容补偿的作用	4
1-1 串联电容补偿对改善电压质量的作用	4
1-2 串联电容补偿与并联电容补偿的比较	9
1-3 串联电容补偿对改善电网功率分布的作用	13
1-4 串联电容补偿对提高输电线送电容量的作用	14
第二章 串联电容补偿装置的设计原则	18
2-1 串联电容补偿装置设置地点的选择	18
2-2 串联电容补偿装置的补偿度和容量的确定	24
2-3 串联电容补偿装置的主结线	33
2-4 串联电容补偿装置的布置	40
第三章 串联电容补偿装置中的主要设备	49
3-1 串联电容器	49
3-2 保护间隙	59
3-3 并联断路器和隔离开关	73
3-4 阻尼元件	78
3-5 串联电容补偿装置中的其他辅助设备	87
第四章 串联电容补偿线路的运行	91
4-1 串联电容补偿装置的运行	91
4-2 串联电容补偿装置中的过电压现象	98
4-3 串联电容补偿装置对继电保护的影响	103
4-4 串联电容补偿线路中的次谐波振荡	111
4-5 串联电容补偿线路中异步电动机的自励磁	115
4-6 串联电容补偿线路中同步电机的自励磁和自摇摆	123

附录一	CY、CL 系列串联电容器	129
附录二	串联电容器的技术条件	132
附录三	同步电机自励磁区的确定	140
附录四	串联电容补偿装置的几点国外情况介绍	149
主要参考资料		156

序 言

随着电力系统的不断发展和扩大，输配电线路的延伸长度和送电功率也相应地不断增加。因此，在中、低压电网中往往由于线路阻抗和输送功率的增大而使电压质量不能满足用户的要求；在高压远距离输电线路路上，则往往由于静态或动态稳定条件的限制，使线路的输送容量受到影响。为了多快好省地发展电力系统，加速祖国社会主义建设，采用串联电容来补偿线路电抗是一种改善电压质量和提高送电容量的有效措施。

在 110 千伏及以下电压等级的电网中，串联电容器主要用来改善电压质量，一般最大可提高线路负荷端电压 10~20%。利用串联电容器补偿线路电抗的作用，使线路的电压降落减少，以保证受电端电压的要求。当线路上带有变化很大的冲击负荷（如炼钢用的电弧炉、冲床、电焊机和电锤等）时，电网电压波动很剧烈，使邻近的电气设备的工作条件大大恶化。在这种情况下，某些常用的分级调压设备（如带负荷调压变压器）将不能很好地来消除这类电压波动，而串联电容器作为一种无迟延的连续调压设备则可以很有效地用来消除这种电压波动。

在高压远距离输电线路路上，串联电容器的作用相当于缩短线路的电气距离，从而提高了线路的稳定极限和送电能力。

此外，在高压或中、低压的不均一闭合电网中（如导线

截面不同，或经变压器联系的不同电压级的线路），功率按电网参数的自然分布往往不符合线路有功功率损耗为最小的条件。应用串联电容器则可改变电网的阻抗比例，使功率分布符合线路有功功率损耗为最小的条件。

由于串联电容补偿装置没有运动或转动的部件，所以使用可靠，操作维护也简单。同时，串联电容器便于拆迁，可以随着负荷的增长逐步设置，在不需要的时候又可很方便地将其移置于别的线路上。由于串联电容补偿装置结构比较简单，所以在很多情况下，较其它一些提高线路电压和送电能力的措施更为经济。

在采用串联电容补偿装置时，也带来一些特殊问题，例如串联电容器的过电压保护问题；对系统继电保护装置正确动作的影响；投入有饱和铁芯的设备时的次谐波振荡；异步电动机的自励磁和同步电机的自摇摆和自励磁等问题。随着运行经验的积累和试验研究工作的开展，上述问题已逐步解决，只要在设计和运行中充分考虑和研究上述有关问题和现象，并因地制宜地采取必要的措施，以避免和克服这些可能出现的问题和异常现象，就可以充分发挥串联电容器的优点，使它成为改善电力系统运行的有效措施。

我国自1954年开始在22~110千伏的线路上应用串联电容补偿装置来改善电网的电压质量（图1）；1966年建成了我国第一个220千伏串联电容补偿站（图2）；接着，在无产阶级文化大革命的胜利凯歌声中，在我国第一条330千伏高压远距离输电线路上使用串联电容补偿装置来提高线路的输送容量达20%左右。

为了进一步推广和使用串联电容补偿技术，我们编写了这本书，供各地设计和应用串联电容补偿装置时参考。限于

我们的水平，错误和不当之处一定不少，希同志们批评和指正。



图 1 110千伏串联电容补偿装置

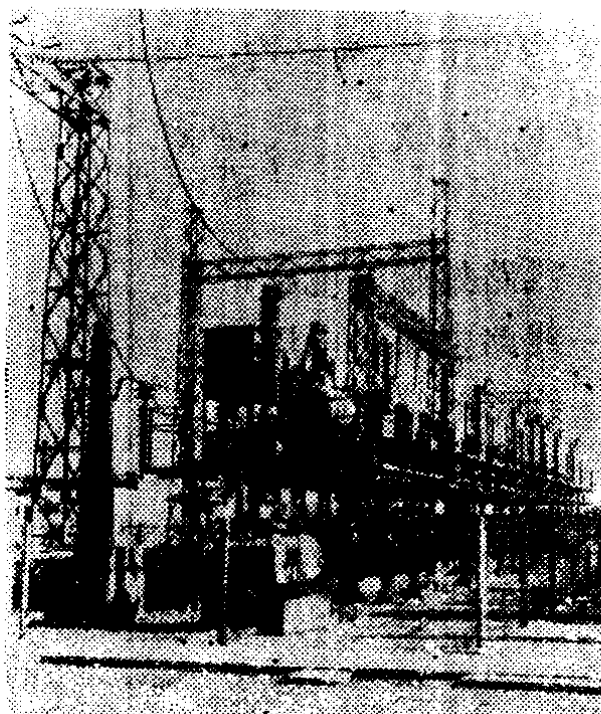


图 2 220千伏串联电容补偿装置

第一章 串联电容补偿的作用

1-1 串联电容补偿对改善电压质量的作用

在交流送电线路中（图1-1a），由于线路电阻和电抗的存在，在通过负荷功率时，将产生电压降落：

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 \quad (1-1)$$

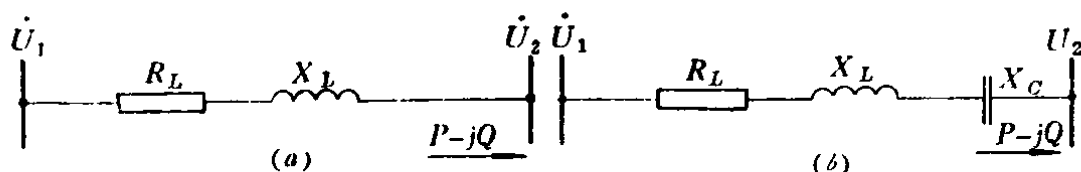


图 1-1 线路示意图

如以线路末端电压 $\dot{U}_2$ 为基准，则电压降落：

$$\Delta \dot{U} = \frac{PR_L + QX_L}{U_2} + j \frac{PX_L - QR_L}{U_2} \quad (1-2)$$

式中 $\dot{U}_1$ —— 线路始端的电压；
 $\dot{U}_2$ —— 线路末端的电压；
 R_L —— 线路的等值电阻；
 X_L —— 线路的等值电抗；
 P —— 通过线路末端的有功功率；
 Q —— 通过线路末端的无功功率。

由上式可知，当通过线路的功率或线路的阻抗很大时，电压降落将很大。当线路始端电压值保持恒定不变时，很大

的电压降落将使线路末端的电压降低, 从而影响用户的正常工作。图1-2a表示以线路末端电压 $\dot{U}_2$ 为基准的线路电压向量图。

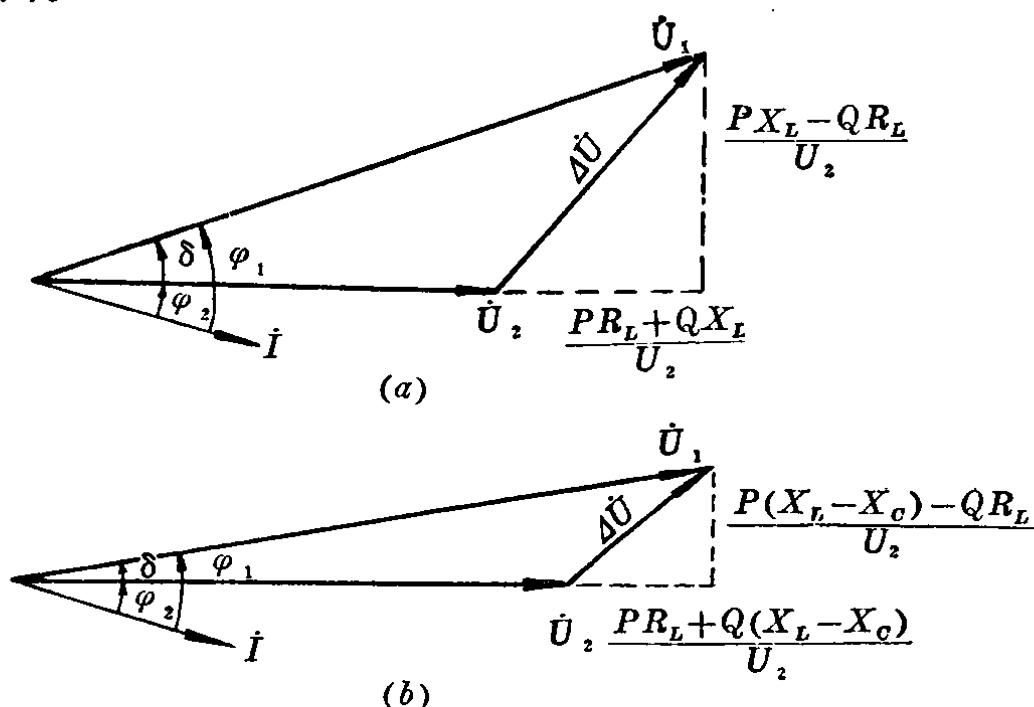


图 1-2 线路电压向量图

由图1-2a可见, 电压降落 $\Delta\dot{U}$ 由与末端电压 $\dot{U}_2$ 同方向的纵分量及与 $\dot{U}_2$ 垂直的横分量构成, 其中对线路末端电压值的影响以纵分量 $\frac{PR_L + QX_L}{U_2}$ 为最大。当线路中串接一个电容器 (X_C) 后 (图 1-1b), 其作用相当于抵消一部分电抗。此时的电压降落:

$$\Delta\dot{U} = \frac{PR_L + Q(X_L - X_C)}{U_2} + j \frac{P(X_L - X_C) - QR_L}{U_2} \quad (1-3)$$

由图1-2b所示的向量图可知, 在维持线路始端电压为恒定的情况下, 串联电容器使电压降落减少, 所以线路末端的电压得以升高。同时, 由于串联电容器的作用, 使电压降落

的横分量也减小, 所以线路始端电压 $\dot{U}_1$ 与末端电压 $\dot{U}_2$ 间的相角差 δ 也得以减小。在末端负荷功率因数 ($\cos\varphi_2$) 不变时, 这一情况相当于使始端的功率因数 ($\cos\varphi_1$) 增大。这是由于功率通过电容器时所产生的无功功率 $\frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} X_c$, 补偿了一部分负荷及线路电抗中所消耗的无功功率。

如果忽略电压降落的横分量, 从式 (1-2) 和 (1-3) 可得到, 接有串联电容器后电压降落变化的百分比值:

$$\begin{aligned}\Delta\Delta U\% &= \frac{\frac{PR_L + QX_L}{U_2} - \frac{PR_L + Q(X_L - X_c)}{U_2}}{\frac{PR_L + QX_L}{U_2}} \times 100 \\ &= \frac{QX_c}{PR_L + QX_L} \times 100 = \frac{\frac{X_c}{X_L}}{1 + \frac{R_L}{X_L} \cot\varphi_2} \times 100\end{aligned}\quad (1-4)$$

由上式可以看到, 线路电压的改善程度和电容器容抗与线路电抗之比有关, 这一比值:

$$K_c = \frac{X_c}{X_L} \quad (1-5)$$

一般称为线路电抗的补偿度。

从式 (1-4) 也可以看到, 在同样的补偿度时, 线路电阻与电抗之比越大, 电压改善的效果就越差。在中、低压配电线路中的电阻 R_L 与电抗 X_L 之比值较大, 有时甚至大于 1, 所以为了满足所需改善电压的目的, 应选用较大的补偿度, 一般 K_c 可达 4 甚至更大。补偿度大于 1 的情况称为过补偿, 也即串联电容器不仅将线路电抗全部补偿, 而且还使线路的合成总电抗变为电容性的。

从式(1-4)中还可以看到, 在同样的补偿度下, 负荷功率因数越小, 对提高电压的效果就越显著。

串联电容器除了一般地用来提高线路末端电压外, 还特别适用于接有变化很大的冲击负荷(如电弧炉、电焊机、电气铁道等)的线路上, 用来消除电压的剧烈波动。这是因为串联电容器在线路中对电压降落的补偿作用是随通过电容器的负荷而变化的, 具有随负荷的变化而瞬时调节的性能, 因此在负荷剧烈变化时, 能自动维持负荷端的电压值, 使电压的波动减小到很小值。

中、低压线路的输送容量往往是受线路电压降落所限制的, 所以在线路上接入串联电容器后, 由于电压降落的减小, 可以相应地提高同一线路的输送容量。

假如忽略电压降落的横分量(电压为35千伏及以下的线路, 或者长度小于100公里、负荷小于30~50兆瓦的110千伏单回线路, 在计算电压降落时可以忽略其横分量), 那末按最大允许电压损失 ΔU_{zd} 所决定的线路输送功率:

$$P_{zd} = \frac{\Delta U_{zd} U_2}{R_L + X_L \operatorname{tg} \varphi_2} \quad (1-6)$$

如果不考虑由于接入串联电容器后的负荷功率因数及线路电压的变化, 那末在同一最大允许电压损失条件下的线路输送功率将提高到:

$$P'_{zd} = \frac{\Delta U_{zd} U_2}{R_L + (X_L - X_C) \operatorname{tg} \varphi_2} \quad (1-7)$$

所以提高线路输送功率的百分率:

$$\begin{aligned} \Delta P_{zd} \% &= \frac{P'_{zd} - P_{zd}}{P_{zd}} \times 100 \\ &= \frac{X_C \operatorname{tg} \varphi_2}{R_L + (X_L - X_C) \operatorname{tg} \varphi_2} \times 100 \end{aligned}$$

$$= \frac{K_c}{1 - K_c + \frac{R_L}{X_L \operatorname{tg} \varphi_2}} \times 100 \quad (1-8)$$

由上式可见，补偿度越大，就可以使线路输送功率提高越多。所以，在中、低压线路中，常常可借串联电容补偿来使线路输送容量提高到按导线发热条件所限制的最大值。

由于串联电容器的接入，使线路电压升高，从而也附带地减少了线路中的有功功率损耗，下面将近似地来估计这一效益。在分析中假定受电端负荷（ P 和 Q ）和送电端电压（ U_1 ）在接入和未接入串联电容器时保持不变，并假定忽略电压降落的横分量。

在未接入串联电容器前，线路的有功功率损耗：

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} R_L \quad (1-9)$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } U_2^2 &= (U_1 - \Delta U)^2 = \left(U_1 - \frac{PR_L + QX_L}{U_2} \right)^2 \\ &\approx U_1^2 - 2(PR_L + QX_L) \end{aligned} \quad (1-10)$$

将式（1-10）代入式（1-9），得到：

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_1^2 - 2(PR_L + QX_L)} R_L \quad (1-11)$$

同样可以得到接入串联电容器后的线路有功功率损耗：

$$\begin{aligned} \Delta P' &= \frac{P^2 + Q^2}{(U_2')^2} R_L \\ &\approx \frac{P^2 + Q^2}{U_1^2 - 2[PR_L + Q(X_L - X_c)]} R_L \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中 U_2' ——接入串联电容器后线路受电端的电压。

所以，由于接入串联电容器后所减少的线路有功功率损耗：

$$\begin{aligned}
 \Delta \Delta P &= \Delta P - \Delta P' \\
 &= \frac{2(P^2 + Q^2)QX_c R_L}{[U_1^2 - 2(PR_L + QX_L)][U_1^2 - 2(PR_L + Q(X_L - X_c))]} \\
 &\approx \frac{2(P^2 + Q^2)QX_c R_L}{U_2^2 (U_2')^2} = \frac{2QX_c}{(U_2')^2} \times \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} R_L \\
 &= \frac{2QX_c \Delta P}{(U_2')^2} \quad (1-13)
 \end{aligned}$$

从上式可知，在其他条件相同时， Q 越大（亦即功率因数越低），或者串联补偿度越大，将使线路的有功功率损耗减少越多。

从式（1-3）、（1-8）和（1-13）可以看到，串联电容器的作用与负荷的功率因数 $\cos \varphi$ 有关（在中、低压电网中 $\cos \varphi$ 一般为 0.6~0.9）。在给定的有功功率情况下，功率因数越小，相应的改善电压、增加送电容量及减少线路有功功率损耗的作用就越大。在功率因数很大（趋近于 1）时，串联电容器的作用就很小了。

1-2 串联电容补偿与并联电容补偿的比较

在中、低压电网中也常常用并联电容器作为无功电源，它也具有改善电压的作用。因此在选择调压方式时，应对串联电容补偿（图1-3a）和并联电容补偿（图1-3b）进行比较。

从式（1-3）可知，串联电容器提高电压的作用主要与负荷的无功功率有关，负荷的功率因数（滞相）越高，即在同一有功功率值时的无功功率越小时，其提高电压的效果越小；并联电容器的作用是补偿线路末端的无功功率，相当于

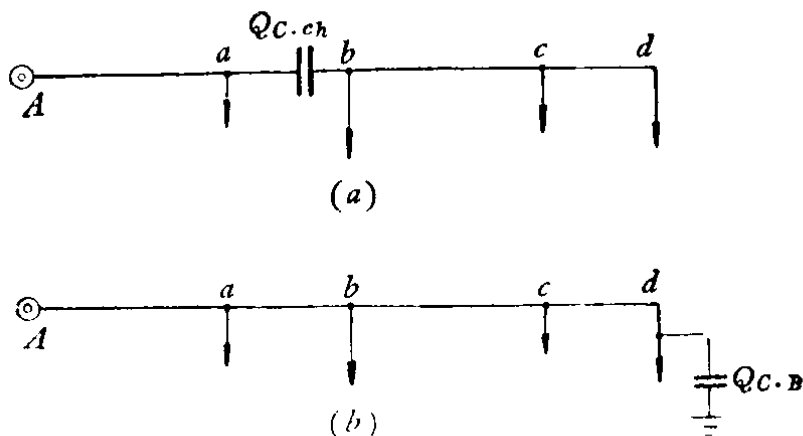


图 1-3 配电线路的串联电容和并联电容补偿

提高负荷的功率因数。自式 (1-2) 可知, 其提高电压的作用主要与线路电抗值有关, 线路的电抗值越小, 其效果越小。因此, 从调压的观点看, 在同一线路上同时应用并联电容器和串联电容器时, 两者的作用是部分地被相互抵消了的, 即并联电容器能提高线路的功率因数, 但其结果却降低了串联电容器的调压效果; 而串联电容器能减小线路电抗, 但其结果却降低了并联电容器的调压效果。

现在来比较一下, 为了达到同样的调压要求, 需要的串联电容器或并联电容器的容量。如果忽略电压降落的横分量, 在分别用串联电容器和并联电容器提高相同的电压大小时:

$$\Delta U = \frac{Q_{C.B} X_L}{U_2} = \frac{Q X_C}{U_2} \quad (1-14)$$

式中 $Q_{C.B}$ —— 并联电容器的容量;

Q —— 负荷的无功功率。

用串联电容器的容量来表示容抗时:

$$X_C = \frac{Q_{C.ch}}{3I^2} = \frac{Q_{C.ch}}{W} Z \quad (1-15)$$

式中 $Q_{C.ch}$ —— 串联电容器的容量;

W —— 负荷的视在功率;

Z —— 负荷的阻抗值。

将式 (1-15) 代入式 (1-14), 可得:

$$\frac{Q_{C.ch}}{Q_{C.B}} = \frac{X_L W}{Z Q} = \frac{X_L}{Z \sin \varphi_2} \quad (1-16)$$

在一般情况下, 如取 $\frac{X_L}{Z} = 0.1 \sim 0.2$, $\cos \varphi_2 = 0.75 \sim 0.9$, 则相应的

$$\frac{Q_{C.ch}}{Q_{C.B}} = 0.15 \sim 0.46 \quad (1-17)$$

由此可见, 为了达到同样的调压目的, 在一般情况下, 串联电容器所需的容量比并联电容器的容量要小。只有在功率因数很大, 线路电抗与负荷阻抗的比值很大, 并考虑串联电容器单位容量价格较并联电容器为大时, 采用并联电容器才有利。此外, 串联电容器的调节电压作用是随着负荷的变化而自动连续调整的, 而并联电容器的作用仅使电压升高某一数值, 当电压下降时, 并联电容器的无功容量却相应地减少, 使电压进一步降低。所以, 为了改善并联电容器的调节电压作用, 需要根据负荷的变化进行频繁的投入和切除电容器操作, 或装设自动切换电容器的设备。

这二种补偿装置对降低电网有功功率损耗的影响也是不同的。串联电容器投入后, 使线路电压升高, 在负荷功率不变的情况下, 它将使通过线路的电流得到相应的减小, 从而也使线路的有功功率损耗减小; 并联电容器则不仅由于线路电压的升高而使线路电流减小, 而主要由于在负荷端补偿了负荷的无功功率, 使通过线路的电流和无功功率减小。所以, 一般来说, 与串联电容器相比较, 并联电容器对减少线路的有功功率损耗有较大的作用, 这可用下述方法近似地加

以证明。

假定串联电容器的容量为 Q_c ，那么由式(1-13)可知，由于接入串联电容器后所减少的线路有功功率损耗：

$$\Delta\Delta P = \frac{2QX_c}{(U'_2)^2} \times \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} R_L = \frac{2Q_c R_L}{(U'_2)^2} Q \quad (1-18)$$

如果选用同样容量的并联电容器，那末减少的线路有功功率损耗：

$$\Delta\Delta P' = \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} R_L - \frac{P^2 + (Q - Q_c)^2}{(U'_2)^2} R_L \quad (1-19)$$

式中 U'_2 ——接入并联电容器后，线路受电端的电压。

将上式简化可得：

$$\begin{aligned} \Delta\Delta P' &= \frac{2Q_c R_L}{U_2^2 (U'_2)^2} \left\{ \left(Q - \frac{Q_c}{2} \right) [U_1^2 - 2(P R_L + Q X_L)] + (P^2 + Q^2) X_L \right\} \\ &= \frac{2Q_c R_L}{U_2^2 (U'_2)^2} \left[\left(Q - \frac{Q_c}{2} \right) U_2^2 + \Delta Q U_2^2 \right] \\ &= \frac{2Q_c R_L}{(U'_2)^2} \left(Q + \Delta Q - \frac{Q_c}{2} \right) \quad (1-20) \end{aligned}$$

式中 $\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} X_L$ ——没有补偿时的线路无功功率损耗。

如果忽略式(1-18)和(1-20)中 U'_2 和 U_2 的差别，那末串联电容器与并联电容器对减少线路有功功率损耗的作用分别与 Q 及 $\left(Q + \Delta Q - \frac{Q_c}{2} \right)$ 成正比。从这里可以看到，一般当 $\Delta Q > \frac{Q_c}{2}$ 时，即串联电容补偿度 $K_c < 2$ 时，在电容器

容量相同的情况下，并联电容器对减少线路有功功率损耗的作用较串联电容器为大。仅在 $K_c > 2$ 的情况下，方能得到相反的结果。因此，一般情况下，在减少线路有功功率损耗为主要目的时，应该选用并联电容器。

1-3 串联电容补偿对改善电网功率分布的作用

在以不同电压等级和导线截面组成的闭合电网中，如果不采取特殊的措施，电网的功率分布将按电网元件的参数进行自然分布。在极大多数情况下，功率的自然分布不符合线路有功功率损耗为最小的条件，就是说各导线的电流密度不相等。为了达到不均一闭合电网的经济功率分布，可采用具有纵横向调节的变压器，但是这种方法所需费用较大，仅在由不同电压等级线路组成，并通过巨大功率的闭合电网中才是经济合理的。在一般的不均一闭合电网中，用串联电容器来补偿线路的部分电抗，以达到功率的经济分布，是比较经济合理的。

图1-4表示由二条不同截面导线的线路组成的闭合电网。在这种情况下，二条线路间的电流与阻抗成反比例分配：

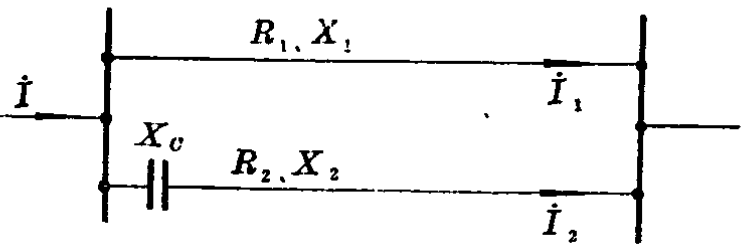


图 1-4 不均一的闭合电网

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_2}{Z_1} \tag{1-21}$$