

农村长距离配电线路 的串联电容补偿

王 树 南 编

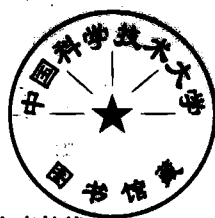
水利电力出版社

內 容 提 要

本书介绍在配电线路上采用串联电容器补偿,以提高线路输电能力、改善供电质量。

本书包括串联电容补偿系统的短路过电压计算、电容器的内过电压保护附件的具体设计与制造以及串联电容器的安装设计、整组试验及运行等问题。

本书可供从事输配电线路工作的工程技术人员参考。



农村长距离配电线路的串联电容补偿

王 树 南 编

*

2186D623

水利电力出版社出版 (北京西郊学院路二里内)

北京市书刊出版业营业许可证出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印

新华书店科技发行所发行 各地新华书店经售

*

787×1092毫米开本*1½印张*34千字

1959年11月北京第1版

1959年11月北京第1次印刷(0001—1,470册)

统一书号: 15143·1763 定价(第9类)0.22元

前 言

在我国社会主义建設全面大跃进的形势下，农村电气化正在飞跃的发展，无数的农村电力排灌站，都将在短期内陸續建立。因此除了大力扩展新的供电系統外，如何从多方面着手充分发挥現有系統的潛力，加速社会主义建設，具有重大的經濟意义。

串联电容器設備一般都应用于补偿超高压綫路的阻抗，以提高电力系統的稳定性。对于串联电容器应用在配电綫路上的問題，近年来也引起了国内外的普遍注意。据1958年全国供电技术會議，国内有許多单位已經初步积累了一些經驗，証明应用串联电容补偿，在提高綫路輸电能力、改善长配电綫路的电压水平和解决电压波动等方面确实有其独到的优点，并收到了一定的效果。

在以往由于串联电容器在国内应用得还很少，有关保护設計及运行維護經驗尚缺乏，加以国内暫时尚无串联电容器产品，而扩大利用国产电力电容器代替串联电容器使用問題，在性能上也还需要作进一步鉴定，因此这些都相互影响和推迟了串联电容器在国内的广泛应用。但在我国建設一日千里的发展形势下，一定很快会得到改观。

本书仅仅是編者在参加上海地区某35千伏农业排灌配电綫路上加装串联电容补偿工作时点滴心得，并主要参考了国内几个先进单位的有关資料，以設計实例为中心，试图系統地叙述串联电容补偿的效益；故在內容上与国内已有資料有頗多相同

之处，且对于一些复杂的运行现象(如感应电动机自起动等)未进行深入研究，但从应用方面以及对于具体工作人员来说，可供参考，故作此整理，以资交流经验。

由于编写匆促和水平所限难免有遗漏或不完善的地方，希望读者多提宝贵意见，俾使今后工作之改进。

此稿在整理过程中，多承钱善德同志协助并校对，特此致谢。

編 者

目 录

第一章	加装串联电容器作为调压方案的选定	4
1-1	串联电容器在配电线路上的应用	4
1-2	长距离农业排灌配电线路的调压要求	6
1-3	调压方案的选定	8
1-4	安装位置与容量选择及其对电压改善的效果	11
第二章	串联电容补偿系统的短路过电压现象	15
2-1	三相短路时电容器的过电压计算	15
2-2	单相接地短路时对于消弧线圈接地系统的影响	18
第三章	电容器的内过电压保护	20
3-1	阻尼元件的选择要求	20
3-2	阻尼元件的具体设计与制造	24
第四章	继电保护	33
4-1	继电保护装置设计	33
4-2	旁路遮断器选择及其操作电源	35
第五章	串联电容器的安装设计	36
第六章	整组试验及运行情况	37
6-1	串联电容补偿装置整组试验	37
6-2	运行情况	42
結束語		45
参考文献		47

第一章 加装串联电容器作为 调压方案的选定

1-1 串联电容器在配电线路上的应用

在配电线路上采用串联电容器补偿一般是为了解决如下几个问题:

1. 过长配电线路的电压偏移;
2. 电弧炉、电焊机引起的电压波动;
3. 在一定范围内可以提高线路输电容量;
4. 减少线路损耗;
5. 改善不等参数的两并联网路间有功及无功负荷分配。

特别是在提高线路输电容量, 避免新建线路, 以解决线路容量暂时不足方面, 保证较长距离农村配电线路的供电电压质量方面, 以及避免电弧炉引起的电压波动对照明用电的影响方面, 在目前具有很大的技术经济意义。

由线路输送功率方程可知:

未加装串联电容器补偿时线路最大输送功率

$$P_{\pi} = \frac{EU}{X}; \quad (1-1)$$

当加装串联电容器补偿时最大输送功率

$$P_{\pi} = \frac{EU}{X - X_c}. \quad (1-2)$$

式中 E ——发电机电势;
 U ——受端电压;
 X ——线路电感阻抗;

X_c ——加装电容器阻抗。

提高的输送容量在一定范围内与加装电容器的阻抗值成正比。上式中未计入线路电阻及线路并联电容，因为实际上对串联电容器补偿效应影响很小。

同样在解决过长配电线路的电压偏移，提高受端电压水平问题上，加装串联电容器在一定的补偿范围内也是有效的。

参考文献13第7页的分析方式，当补偿度不超过80%时，可以应用忽略电压降纵分量的简化计算公式：

在未加装串联电容器时

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U}; \quad (1-3)$$

当加装串联电容器时

$$\Delta U = \frac{PR + Q(X - X_c)}{U}. \quad (1-4)$$

如果补偿度超过80%，必需计入纵分量才能得到正确的计算结果，此时计算公式如下：

在未加装串联电容器时

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} + \frac{1}{2U} \left(\frac{PX - QR}{U} \right)^2; \quad (1-5)$$

当加装串联电容器时

$$\Delta U = \frac{PR + Q(X - X_c)}{U} + \frac{1}{2U} \left(\frac{P(X - X_c) - QR}{U} \right)^2. \quad (1-6)$$

式中 P ——线路有功功率；

Q ——线路无功功率；

R ——线路电阻；

U ——线路相电压；

X_c ——加装电容器阻抗。

在計算中需要計入电压降縱分量的原因是因为此时送端电压 U_1 与受端电压 U_2 之間的角差将迅速增大, U_1 的矢量与其在 U_2 上的射影值已經有了显著的差別。

由上可知提高受端电压, 相应地也提高了輸电容量。特別应指出的是加装串联电容器后电压补偿水平与綫路通过的功率成自然調节的正比关系, 因此負荷功率变动或波动負荷 (如电弧炉及大容量电焊机) 引起的用戶处灯光閃爍問題亦可以解决。其次由于串联电容器具有改变感抗及功率角的特性, 可以人为地使經常并列运行的两平行綫路的功率分配均匀, 降低系統綫損。

1-2 长距离农业排灌配电綫路的調压要求

一、地区系統接綫及沿綫負荷簡况实例

地区系統接綫及各負荷点安装容量、送电綫长度和截面等, 如图1-1所示(見书末插图)。

地区某35千伏輸电綫路由A樞紐站供电, 中途有紗厂及农业負荷, 終端也有紗厂負荷, A站至B站綫路主要是供給地区农业負荷。綫路由A站至B站, 全长70公里, 輸送功率近8,000千伏安。由B站供給的地区排灌負荷主要是水泵机站, 共17点分布于各区低地, 总面积为23.3万亩, 各水泵机站电动机額定容量大部分是40~60匹馬力 ($\cos\varphi=0.88$)。全区負荷以每100亩为1瓩計, 并計入同时率 $S=0.9$, 共計2,100瓩。

又据苏南1957年某农业排灌机站实际統計, 在6、7、8、9月中灌溉使用1,300小时, 排澇690小时, 故对农业排澇年最高負荷利用小时数估計为1,500。

B站安装有35/10.5千伏、1,800千伏安及1,000千伏安变压器各一台。10千伏配电綫共四路; 均用A-16导綫, 每路支

接3~4个机站，其中最长的线路约10~12公里，机站最大容量为320千伏安。

二、用户处电压水平计算及调压措施的必要性

计算说明：

(1) A站35千伏母线考虑逆调压，最大负荷时为33.5千伏，最小负荷时为32.5千伏。

(2) 35千伏线路各点负荷示于图1-2中。计算中除纱厂负荷外，对于农村用电最小负荷估计为最大负荷时的30%（据文献2曾述及苏联农业管理局设计规程中对此值取25%）。

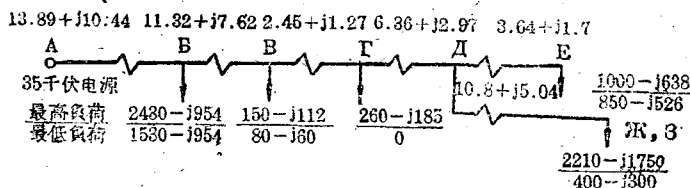


图 1-2. 35千伏系统负荷计算等价值图

(3) 站两台主变压器的10千伏侧按分列运行；10千伏线路以最长的一路计算，并估算至水泵站380伏低压电源侧。

(4) 对于35千伏以下电压的计算，一般均应用概略计算公式（参考文献8）。

线路电压损耗

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} \times 10^{-3} \text{ 千伏}; \quad (1-7)$$

配电变压器电压损耗

$$\Delta U = U_r \% U \cos \varphi \frac{W}{W_n} \text{ 千伏}; \quad (1-8)$$

线路功率损耗

$$\Delta W = \left(\frac{P^2 + Q^2}{U^2} \times 10^{-3} \right) (R + jX) \text{ 瓩}. \quad (1-9)$$

式中 U ——綫路綫电压(千伏);

P ——綫路有功功率(瓩);

Q ——綫路无功功率(千乏);

W ——負荷容量(千伏安);

W_n ——变压器額定容量(千伏安)。

計算結果:

(1) Ⅱ站35/10千伏变压器至配電綫終端电压損耗 $\Delta U_1\%$
 $=20\%$, 电压偏移 $\Delta U'_1\% = 16\%$ 。

(2) A站35千伏母綫至Ⅱ站的70公里綫路总电压損耗
 $\Delta U_2\% = 29\%$, Ⅱ站母綫电压仅为23.84千伏, 电压偏移
 $\Delta U'_2\% = 21\%$ 。

根据上述电压計算結果, 由电源至水泵机站电动机380伏側的总电压損耗达49%, 如不采取調压措施将无法使电动机启动。根据苏联“电气装置安裝規程”乡村电气装置第17条, 对于农村电网上的低压电动机允許电压偏移范围应当小于+7.5%, 大于-10%。故对于35千伏綫路部分20%的电压偏移幅度, 要求全部补偿, 即补偿端电压 $\Delta U = 35 \times 20\% = 7$ 千伏。

1-3 調压方案的选定

一、調压方式及技术經濟比較的基础

配电网調压方式一般有如下几种:

(1) 利用电厂发电机电源逆調压;

(2) 适当选择变压器分接头或选用带負荷自动切换分接头的变压器;

(3) 加装自耦变压器;

(4) 加装加压变压器, 或装設具有橫向調压作用的特殊升压变压器;

(5) 装置普通并联电容器或同步补偿机补偿无功功率；

(6) 装置串联电容器补偿线路电抗。

根据一般情况，电压损耗达30%以上，受电端母线电压偏移达15%以上，依靠(1)、(2)、(3)项调压方法，已经远不能符合供电电压质量要求。

例如，利用发电机进行逆调压，其范围一般不超过 $\pm 5\%$ ，而电压母线又往往受到其他重要用户调压要求的限制。又如对于适当选择变压器分接头问题，特别是对于沿线支接负荷多的情况，很有可能各配电站主变压器当初在选择分接头时，没有按系统远景考虑，以后却因为沿线负荷变动大，必需选用带负荷自动切换分接头的变压器，这样就需要调换大批此种变压器，而国内暂时尚未生产供应，故采用这种方案，实际在经济意义上及现实性上都是不宜考虑的。

对于加装作升压用的具有死分接头的自耦变压器，按补偿度要求而言，需要选择很大容量的自耦变压器，这样，一方面不经济，也来不及改绕或订购，另一方面采用自耦变压器调压，对于系统负荷有很大变动的线路还是不能符合供电质量的要求。

关于(4)项两种方式之应用及选择，参考文献2。结合本实例而言，后者，在国内尚无这种产品，而前者也来不及进行改绕或订购，又因为本实例要求的补偿度较大，需要选用的调压变压器容量亦将很大，与其他调压方案比较，估计也并不经济。

对于(5)、(6)项调压方式，可由电压损耗一般计算公式来分析。

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U}, \text{ 取公式中 } QX \text{ 部分来比较串联电容器}$$

与并联电容器的补偿效果。

令 綫路要求补偿的电压损耗 ΔU 不变。

則 $Q(X - X_c) = (Q - Q_c)X$,

$$QX_c = Q_c X, \quad (1-10)$$

式中 Q_c ——电容器容量，千乏；

X_c ——电容器电抗，欧。

即当 Q 相对地小于 X 时， Q_c 亦相对地小于 X_c ，选用并联电容器较为经济。反之则选用串联电容器比较经济。

在具体设计方案比较中，可在相同的计算条件下，列表比较各种安装容量下电容器投资、折旧、运行、维护、年损耗费用等，以及比较在相同经济价值下对于受端电压水平的改善程度。

此外，对调压问题有必要时，也可以结合线路升压的可能性或扩大导线截面或另行新建线路等方案作比较。但这些方案，在原有基础上进行改进时，往往会受到技术条件的限制。

二、采用串联电容补偿作为调压方案的选定

综上所述，根据调压要求，以及从设备的现实出发，(1)、(2)、(3)、(4)项调压方法，是不符合要求，也不宜采用的。

又如选择并联电容器，一般分散装置在各用户端效率较好，如为集中补偿线路无功功率时一般装置在线路末端，当线路要求很大电压范围的补偿时，选择的电容器容量将很大，且采用并联电容器调压时，即使带有分组切换开关，也很难获得平稳的电压变动；而串联电容器，却具有很多独特的优点。线路所要求补偿的端电压在一定范围内约与电容器所通过的负荷容量成正比，使电压波动得到高度自动化的调节。

在国外应用在配电线路上的串联电容器，补偿度为1~4(参考文献B)，因此可以获得足够的补偿电压幅度。故选用串联

电容器作为解决长配电线路电压偏移的方案提出，在技术经济上是较为合理的。

1-4 安装位置与容量选择及其对电压改善的效果

一、安装地点

由于35千伏以下配电线路，可以忽略线路并联电容，继电保护还不复杂，且没有系统稳定问题等，故对于串联电容器的安装位置，一般没有什么特殊要求。如从减少线损来看，装置在始端较好，但将相应地升高始端运行电压，有时几乎会达到不能允许的程度，且装置在始端会相应增加串联电容的穿越功率和遭受故障的机会。如果安装在终端站，则短路时电流冲击可以减小，但不能改善沿线支接负荷的电压质量。故在理论上对于具有支接负荷的线路，串联电容器安装在离电源侧 $1/3 \sim 1/2$ 的干线处最为适宜；当然具体地点的选择是与运行条件、直流操作电源设备以及其他具体选择因数有关。本实例选择在离电源侧30公里处，占全长 $3/7$ 的B站内，站内运行操作条件较好，同时电容器安装在B站出线处，负荷较小，电容器容量可较小，而B站前各用户的电压水平，基本上尚可符合要求。

二、容量选择

容量选择，主要按照补偿电压要求，并用安装地点通过的负荷容量来校验。

当线路接有电容器时，其前后的电压及负荷如图1-3所示。



图 1-3 线路接有电容器时其前后的电压及负荷

計算公式: $S_a = \sqrt{3} U_a I$; $Q_a = Q_b - Q_c$;

$$S_b = \sqrt{3} U_b I$$

$$\frac{U_a}{U_b} = \frac{S_a}{S_b} = \frac{\sqrt{P_b^2 + (Q_b - Q_c)^2}}{\sqrt{P_b^2 + Q_b^2}} = K.$$

簡化后得選擇公式:

$$Q_c = P_b \left\{ \frac{Q_b}{P_b} - \sqrt{\left(\frac{U_a}{U_b} \right)^2 \left(1 + \left(\frac{Q_b}{P_b} \right)^2 \right) - 1} \right\}$$

$$= P_b \beta_a. \quad (1-11)$$

按通过容量复算則:

$$Q_c = 3 I^2 X_c. \quad (1-12)$$

式中 U_a ——电容器前綫路电压;

U_b, P_b, Q_b ——分别为电容器后綫路电压及有功功率和无功功率容量;

I ——通路电流;

X_c ——需要补偿的电容电抗;

β_a ——選擇因数。

選擇因数 β_a 关系曲綫如图1-4所示。

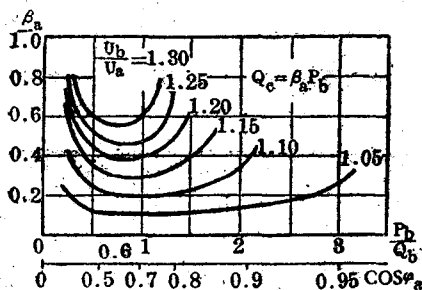


图 1-4 選擇因数 β_a 关系曲綫

在具体選擇中, 利用(1-11)式計算比較繁复; 由图 1-4 曲綫所查得的数值可作为概略性容量估計用, 而在电容电抗選擇公式中同样已包括补偿电压要求(参考文献 1), 再用(1-12)式进行通路容量复算。

又电容器电抗计算公式:

$$X_c = U \Delta U / Q_p, \quad (1-13)$$

式中 U ——安装地点线路电压;

ΔU ——补偿电压;

Q_p ——安装地点通过之无功容量。

为免于选择的电容器容抗过分大于线路电抗, 致使在线路暂态过程中引起异常现象, 因此对加入串联补偿的线路, 给出一个补偿度 K 的概念, 以作估量。

$$K = X_c / X_L, \quad (1-14)$$

式中 X_c ——串联电容电抗;

X_L ——全线路电感电抗。

本实例中串联电容器的选择计算如下:

串联电容补偿计算接线如图1-5。

通过容量 $W_p = 5000$ 千伏安;

$\cos \varphi = 0.8$; $U = 36$ 千伏;

要求补偿电压 $\Delta U = 7$ 千伏。

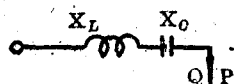


图 1-5 计算接线图

$$I_p = 5000 / \sqrt{3} \times 36 = 80 \text{ 安};$$

由公式(1-13)得: $X_{pac} = 36 \times 7000 / 5000 \times 0.6 = 84$ 欧。

由公式(1-12)计算容量得:

$$Q_{pac} = 3 \times 80^2 \times 86 = 1620 \text{ 千乏}。$$

本实例内为结合系统上有一批瑞典ASEA制CTD-1型串联电容器:

其规范为: 型号——CTD-1型(瑞典ASEA制);

额定容量——20千乏;

额定电压——1千伏;

电容——63.5微法;

电抗——50欧。

故选用該型电容器 7 个串联、4 个并联共 28 个，則裝置容量 $Q_{\text{CT}} = 3 \times 20 \times 28 = 1680$ 千乏，容抗 $X_c = 50 \times 7/4 = 87.5$ 欧，已知 $X_L = 30.73$ ，則补偿度 $K = X_c/X_L = 87.5/30.73 = 2.84$ 。

三、加装串联电容器补偿后沿綫电压改善效果(如图 1-6 曲线)

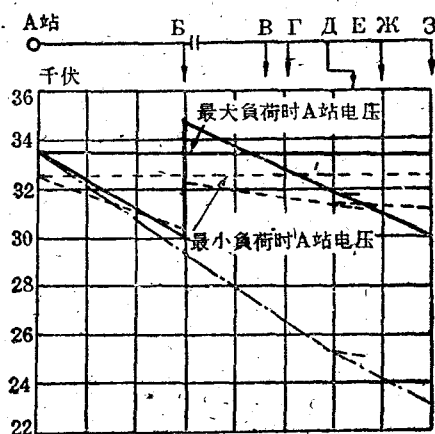


图 1-6 加装串联电容器后沿綫补偿效果

曲线——表示最大負荷时情况；

曲线.....表示最小負荷时情况；

曲线-·-·表示未加装串联补偿最大負荷时情况。

由曲线看出在本实例中 B 站加装串联电容器后，除保证了 B 站电压水平外，沿綫电压水平均得到改善，在 B 站前用户亦基本上得到满足。

第二章 串联电容补偿系统的短路 过电压现象

串联电容器与并联电容器在运行中所处地位是不同的，一般选择串联电容器只根据额定电流，所选额定电压比线路电压低得多。但当线路发生短路时，系统短路电流要比额定电流大得多，在电容器两端形成严重的过电压。因此短路计算就作为这种过电压倍数的估计，以及供选择保护装置时作为参考。在这里仅按一般与运行中关系较大的三相短路过电压及35千伏消弧线圈系统单相接地时过电压两种情况进行简单计算及分析。

2-1 三相短路时电容器的过电压计算

一、概略计算电容器通过之短路容量

已知基础容量 = 100 兆伏安；

基础电压 = 35 千伏；

A 站 35 千伏短路容量为 685 兆伏安（在计算时期估计值）；

电源百分阻抗 $x\% = 10^4 / 685 = j14.6$ 。

列出其短路计算等价阻抗，如图 2-1 所示。

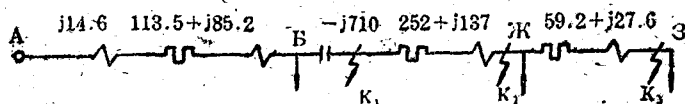


图 2-1 短路计算等价阻抗图

计算 $K_1 = 10^4 / 113.5 + j(14.6 + 85.2 - 710)$ 。

$= 10^4 / 113.5 + j610.2 = 16$ 兆伏安；

$K_2 = 16.7$ 兆伏安；