

串联电容引起的电动机自激

清华大学电力工程系
南昌有色冶金设计院
山西省电力局 串联电容补偿研究小组 著

科学出版社



内 容 简 介

本书是著者近年来研究和解决配电网中的串联电容补偿引起的交流电动机自激(或称自励磁)问题的科研成果。书中系统地介绍了著者的研究成果和见解,包括交流电动机自激的物理特征,分析计算方法和克服自激的措施。

书中包括三大部分:串联电容补偿和交流电动机自激的一般知识;交流电动机自激的理论分析、工程计算方法和克服自激的措施;交流电动机自激的动态模拟实验和现场工业试验。

本书可供从事串联电容补偿工作的工人、技术人员和高等院校的师生参考。

串 联 电 容 引 起 的 电 动 机 自 激

清华大学电力系
南昌有色冶金设计院 串联电容补偿研究小组 著
山西省电力局

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

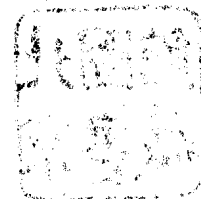
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1978 年 5 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/16
1978 年 5 月第一次印刷 印张: 17 插页: 10
印数: 0001—16,200 字数: 390,000

统一书号: 15031·173

本社书号: 1021·15—5

定 价: 2.15 元



前 言

目前, 串联电容补偿在我国配电网中正得到广泛应用. 这是改善配电网电压水平、提高输送容量的一种有效措施. 不过, 采用串联电容补偿也带来了一些尚未解决的技术问题, 例如, 在 110 千伏、35 千伏及 10 千伏线路中, 串联电容补偿可能引起交流电动机, 特别是大容量的同步电动机和异步电动机的自激(或称自励磁), 致使电动机无法正常运行. 因此, 自激问题往往成为推广应用串联电容补偿技术的一个障碍, 迫切需要研究解决.

1972 年开始, 清华大学电力系、冶金部南昌有色冶金设计院和山西省电力局共同组成研究小组, 紧密结合工程实际, 在实践的基础上提高理论, 对串联电容补偿引起的交流电动机自激问题, 进行了大量的动态模拟实验研究、理论分析和现场工业试验; 深化了对电动机自激的物理特征的认识, 提出了自激的计算方法及克服自激的措施.

本书主要内容如下:

1. 总结了国内多年来串联电容补偿的工程实践经验, 介绍了简化线路和磁吹间隙.
2. 提出了异步电动机自激是机电参数共振现象的看法. 理论分析和实验结果说明, 不仅电动机的电磁参数(电阻、电抗等)影响自激, 而且电动机的机械参数(惯性、负载特性等)和电源电压也影响自激. 只是在电动机惯性较大的条件下, 电磁过渡过程比机械过渡过程快得多时, 电动机的自激才能作为电磁参数共振现象来处理. 同步电动机的自激也是机电参数共振现象. 同步电动机除可能发生和异步电动机相同的“异步自激”现象外, 还可能发生“凸极同步自激”和“推斥同步自激”的现象.
3. 利用坐标转换和小振荡理论, 分析了单机自激和与较复杂电网相联的交流电动机的自激问题, 提出了在考虑和不考虑机械惯性影响情况下的自激区的理论分析方法、工程计算方法及近似估算方法, 以便在工程实际中加以应用. 对于异步电动机稳态自激时的电流和转矩也进行了比较详细的分析.
4. 结合生产实际的需要, 总结了已有的克服自激的措施, 提出了克服自激的措施.

本书第一章由严平欧、郭永基编写, 第二章至第四章由郭永基、高景德编写, 第五章至第八章由高景德编写, 第九章由郭永基、顾永昌编写, 第十章由马维新编写, 第十一章由高景德、顾永昌编写, 第十二章由山西省电力局中心试验所串补试验小组编写, 全书由高景德主编. 参加研究工作的还有谢小平、郑逢时、杨海先、高子伟、陈丕璋和发电专业七〇届部分学生.

在进行这一科研工作的过程中, 特别是在现场工业试验中, 曾得到电力和冶金部门有关单位的大力支持, 在此谨表谢意.

由于我们水平有限, 书中难免有缺点和错误, 欢迎读者批评指正.

著者 1975 年 2 月

目 录

前言	i
----------	---

第一篇 串联电容补偿和交流电动机自激的一般知识

第一章 串联电容在配电网中应用的简介	1
§1.1 串联电容补偿的基本原理及主要作用	1
§1.2 串联电容补偿与并联电容补偿的比较	3
§1.3 串联电容补偿装置安装点的选择	5
§1.4 串联电容补偿装置容量的计算	6
§1.5 串联电容补偿装置的主结线	9
§1.6 串联电容补偿装置的主要元件	13
§1.7 串联电容器组的保护装置	20
§1.8 串联电容补偿装置的布置	24
§1.9 串联电容补偿引起的铁磁谐振现象及其防止措施	27
§1.10 串联电容补偿可能引起交流电动机的自激	28
第二章 交流电动机自激问题的简介	30
§2.1 概述	30
§2.2 异步电动机的自激现象和危害	30
§2.3 $r-L-C$ 电路产生振荡的条件	32
§2.4 异步电机的等值电路、阻抗特性及转矩特性	34
§2.5 异步电动机自激的物理特征	36
§2.6 异步电动机的自激区及其影响因素	37
§2.7 克服异步电机自激的措施	40
§2.8 同步电动机的异步起动	47
§2.9 同步电动机的自激	49

第二篇 交流电动机自激的理论分析和工程计算方法

第三章 不考虑惯性影响时,异步电动机的自激区	51
§3.1 概述	51
§3.2 不考虑惯性影响时,异步电动机的基本方程	51
§3.3 异步电机自激区的边界条件	54
§3.4 异步电机自激区的计算方法	58
§3.5 异步电机的电磁参数对自激区的影响	62
§3.6 异步电机自激区的近似估算	66
§3.7 不考虑惯性影响时,异步电机自激区的计算实例	70
第四章 不考虑惯性影响时,电网结线方式和运行方式对异步电机自激区的影响	79
§4.1 概述	79
§4.2 不考虑惯性时,异步电机和较复杂的电网相联时的基本方程	79

§ 4.3 和较复杂的电网相联的异步电机的自激区的分析方法·····	82
§ 4.4 串联电容两侧并联电阻对自激区的影响·····	85
§ 4.5 串联电容两侧并联电抗对自激区的影响·····	87
§ 4.6 串联电容两侧并联阻抗对自激区的影响·····	89
§ 4.7 电网支路负载对异步电机自激区的影响·····	91
§ 4.8 异步电机和较复杂电网相联时的自激区计算实例·····	93
第五章 异步电动机在稳态自激时的电流和转矩 ·····	104
§ 5.1 概述 ·····	104
§ 5.2 异步电机稳态自激时的电流及磁链 ·····	105
§ 5.3 异步电机稳态自激时的电磁转矩及功率 ·····	110
§ 5.4 异步电机在自激区内的稳态电流及转矩 ·····	113
§ 5.5 异步电机在自激区内的稳态电流及转矩的计算公式及步骤 ·····	115
§ 5.6 和较复杂电网相联的异步电机的稳态电流和转矩 ·····	123
第六章 计及惯性影响时,异步电动机的自激区 ·····	126
§ 6.1 概述 ·····	126
§ 6.2 计及惯性影响时,异步电机的基本方程 ·····	126
§ 6.3 异步电机在稳态运行时的基本关系 ·····	129
§ 6.4 异步电机的微干扰方程 ·····	130
§ 6.5 计及惯性影响时,异步电机自激区的确定 ·····	132
§ 6.6 异步电机惯性常数对自激区的影响 ·····	133
§ 6.7 电源电压对自激区的影响 ·····	138
§ 6.8 负载特性对自激区的影响 ·····	138
§ 6.9 异步电机稳态小值振荡的基本方程 ·····	139
§ 6.10 异步电机稳态小值振荡和单复参数平面上的 D -域划分法的关系 ·····	140
§ 6.11 异步电机稳态小值振荡和米哈依洛夫判据的关系 ·····	141
§ 6.12 异步电机的同步转矩系数和异步转矩系数的计算公式 ·····	142
§ 6.13 利用同步转矩系数及异步转矩系数,确定异步电机的自激区 ·····	144
§ 6.14 计及电机惯性影响时,异步电机自激区的计算公式及步骤 ·····	146
第七章 计及惯性影响时,电网接线方式和运行方式对异步电机自激区的影响 ·····	152
§ 7.1 概述 ·····	152
§ 7.2 计及惯性影响时,和较复杂的电网相联时的异步电机的基本方程 ·····	152
§ 7.3 异步电机在稳态运行时的基本关系式 ·····	155
§ 7.4 计及惯性影响时,和较复杂电网相联的异步电机的微干扰方程 ·····	156
§ 7.5 计及惯性影响时,和较复杂电网相联的异步电机自激区的确定 ·····	158
§ 7.6 计及惯性影响时,两台并联运行的异步电机的基本关系式 ·····	162
§ 7.7 一台电机的惯性很大时,另一台并联运行的异步电机的自激区的确定 ·····	167
§ 7.8 电网支路负载的阻抗 ·····	169
§ 7.9 两台并联运行的电机的惯性常数都较小时,其中一台电机的自激区的确定 ·····	170
第八章 同步电动机的自激问题 ·····	175
§ 8.1 概述 ·····	175
§ 8.2 同步电机的基本方程和自激的特点 ·····	175
§ 8.3 经串联电容和电源直接相联的同步电动机在起动过程中的凸极同步自激区 ·····	184

§ 8.4 经串联电容和电源直接相联的同步电动机在起动过程中的异步自激区	187
§ 8.5 同步电机纵横轴平均阻抗的等值异步电机的自激区	194
§ 8.6 考虑惯性影响和电网结线方式及运行方式时, 同步电动机的自激区	198

第三篇 交流电动机自激的动态模拟实验和现场工业试验

第九章 35 千伏线路串联电容补偿引起异步电动机自激的动态模拟实验研究	204
§ 9.1 物理模拟的建立	204
§ 9.2 物理模拟实验目的和项目	212
§ 9.3 某 35 千伏供电系统自激状况和自激最严重的运行方式	212
§ 9.4 克服自激的措施	220
§ 9.5 实验研究的结论	227
第十章 35 千伏线路串联电容补偿的现场工业试验	229
§ 10.1 概述	229
§ 10.2 带负载时、用旁路刀闸投入和撤出串联电容器试验	229
§ 10.3 空载投入变压器试验	231
§ 10.4 串联电容放电间隙自灭弧能力试验	231
§ 10.5 三相短路试验	232
§ 10.6 大型异步电动机的自激试验	232
§ 10.7 现场试验主要结果	235
第十一章 110 千伏线路串联电容补偿引起电动机自激的动态模拟实验研究	237
§ 11.1 概述	237
§ 11.2 原型供电系统概况及物理模拟系统	237
§ 11.3 同轴 2×1250 瓦异步电动机在起动及正常运行时的模拟系统和实验结果	239
§ 11.4 大型同步电动机在起动和并联运行时的模拟系统和实验结果	246
§ 11.5 试验研究的结论	257
第十二章 110 千伏线路串联电容补偿后, 起动大型同步电动机的现场工业试验	258
§ 12.1 概述	258
§ 12.2 试验目的	258
§ 12.3 试验内容及接线	258
§ 12.4 试验条件及测量结果	259
§ 12.5 现场试验的主要结论	260
参考文献	262
补充参考文献	263

第一篇 串联电容补偿和交流电动机自激的一般知识

第一章 串联电容在配电网中应用的简介

§1.1 串联电容补偿的基本原理及主要作用

在配电网中，串联电容补偿主要用以减少线路压降，改善电压水平和增加输送容量。如图 1.1-1 所示，当配电线路中通过负荷功率时，即产生电压降落。没有串联电容补偿时的电压降落值为：

$$\Delta U = \frac{PR + Qx_L}{U_2} + j \frac{Rx_L - QR}{U_2} \quad (1.1-1)$$

式中 P 、 Q ——线路末端的有功及无功功率

R 、 x_L ——线路电阻及感抗

U_2 ——线路末端电压

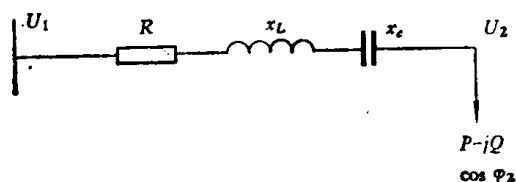


图 1.1-1 配电线路等值电路图

当有串联电容补偿时，电压降落值为：

$$\Delta U = \frac{PR + Q(x_L - x_c)}{U_2} + j \frac{P(x_L - x_c) - QR}{U_2} \quad (1.1-2)$$

式中 x_c ——串联补偿装置的容抗

没有或有串联电容补偿时的电压向量图如图 1.1-2(a) 及 1.1-2(b) 所示。可见， x_c 使电压降落值减少。当送端电压 U_1 恒定时，受端电压 U_2 可以提高。 x_c 越大，对改善受端电压的作用越大（此一作用只限于一定的范围之内，详见 §1.1~§1.4）。从电压向量图还可看出，当受端功率因数 $\cos \varphi_2$ 不变时，串联电容能使送端功率因数 $\cos \varphi_1$ 得以改善。

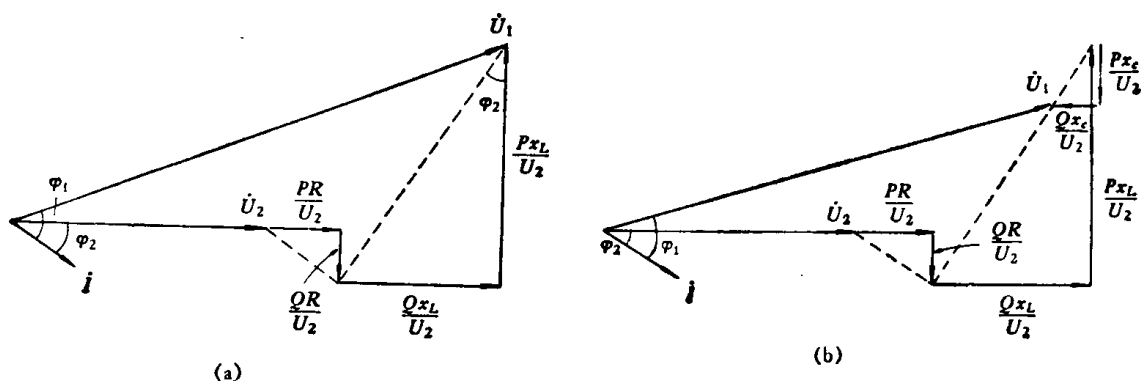


图 1.1-2 电压向量图

一般用电容器容抗 x_c 与线路感抗 x_L 之比来表示电容器容抗对线路感抗的补偿程度，称为补偿度 K_c ，用下式表示：

$$K_c = \frac{\text{串联电容补偿装置每相容抗}(\Omega)}{\text{线路每相感抗}(\Omega)} = \frac{x_c}{x_L} \quad (1.1-3)$$

在配电网中，一般 $K_c = 1 \sim 4$ 。 K_c 值在 1.5~2 以上称为高补偿度；在 1~1.5 范围

内为中补偿度；在 0.5 左右为低补偿度。应当指出，因 x_L 中并不包括电动机及变压器等设备的感抗，所以并不能只根据 K_c 值的大小来估计交流电动机自激的可能性。

配电线路的输送容量往往受线路电压损失的限制。加装串联电容补偿装置后，由于电压损失减小，可以提高线路的输送容量。如果忽略电压降落的横分量（电压为 35 千伏及以下的线路，或在长度小于 100 公里、负荷小于 30~50 兆瓦的 110 千伏单网线路，在计算电压降落时，一般可忽略其横分量，这时电压降落值与电压损失值相同），则由最大允许电压损失 $\Delta U_{\max}$ 所决定的线路最大输送功率为：

$$P_{\max} = \frac{\Delta U_{\max} \cdot U_2}{R + x_L \operatorname{tg} \varphi_2} \quad (1.1-4)$$

式中 φ_2 为负荷功率因数角

如果不考虑串联电容补偿后受端电压 U_2 及功率因数 $\cos \varphi_2$ 的变化，则串联补偿后，线路最大输送功率将提高至以下的数值：

$$P'_{\max} = \frac{\Delta U_{\max} \cdot U_2}{R + (x_L - x_c) \operatorname{tg} \varphi_2} \quad (1.1-5)$$

亦即提高输送功率的百分率为：

$$\begin{aligned} \Delta P_{\max} \% &= \frac{P'_{\max} - P_{\max}}{P_{\max}} \times 100 = \frac{x_L \operatorname{tg} \varphi_2}{R + (x_L - x_c) \operatorname{tg} \varphi_2} \times 100 \\ &= \frac{K_c}{1 - K_c + \frac{R}{x_L \operatorname{tg} \varphi_2}} \times 100 \end{aligned} \quad (1.1-6)$$

由上式可见，补偿度 K_c 越大，线路输送功率提高就越多，有时甚至可以用串联补偿来使线路输送功率提高到导线发热条件所限制的最大值。但应注意，在导线截面不变的条件下，输送功率增加过多时，线路损失可能大到不合理的程度（如 20%，甚至更多）。所以用串联补偿来增加线路的输送容量时，应经过综合的技术经济比较。一般说来，只有在导线截面具有裕度时，才宜采用串联补偿的办法来提高输送容量。

如果串联补偿的目的仅在于减少线路电压损失，改善电压水平，而输送功率保持恒定，则串联补偿还有减少线损的效益。下面作近似的分析。在分析中假定线路受端功率 $(P - jQ)$ 及送端电压 (U_1) 在接入串联电容前后保持不变。

接入串联电容前，线路的有功损失为：

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} R \quad (1.1-7)$$

$$\text{式中 } U_2^2 = (U_1 - \Delta U)^2 \approx \left(U_1 - \frac{PR + QX_L}{U_2} \right)^2 \approx U_1^2 - 2(PR + Qx_L) \quad (1.1-8)$$

将式(1.1-8)代入(1.1-7)式，得：

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_1^2 - 2(PR + Qx_L)} R \quad (1.1-9)$$

同样，可以得到接入串联电容后的线路有功损失为：

$$\Delta P' = \frac{P^2 + Q^2}{(U_2')^2} R \approx \frac{P^2 + Q^2}{U_1^2 - 2[PR + Q(x_L - x_c)]} R \quad (1.1-10)$$

所以，串联补偿后减少的线路有功损失为：

$$\begin{aligned}\Delta P_c &= \Delta P - \Delta P' = \frac{2(P^2 + Q^2)Qx_c R}{[U_1^2 - 2(PR + QX_L)]\{U_1^2 - 2[PR + Q(x_L - x_c)]\}} \\ &= \frac{2(P^2 + Q^2)Qx_c R}{U_2^2 (U_2')^2} = \frac{2Qx_c}{U_2'^2} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} R = \frac{2Qx_c}{U_2'^2} \cdot \Delta P\end{aligned}\quad (1.1-11)$$

实际上,由于串联补偿后受端电压提高,负荷所吸取的无功功率增加,功率因数 $\cos \varphi_2$ 稍有降低,所以 ΔP_c 之值将较上式稍小一些。

综上所述,串联补偿有改善电压水平、增加输送容量及减少线损等作用。这些作用的大小与线路感抗 x_L 、线路电阻 R 及受端功率因数 $\cos \varphi_2$ 有关; $\frac{x_L}{R}$ 的值越大, $\cos \varphi_2$ 的值越小,则效果越好。当 $\frac{x_L}{R} > 1$ 及 $\cos \varphi_2 < 0.9$ 时,效果特别显著;当 $1 > \frac{x_L}{R} > 0.6$ 及 $\cos \varphi_2 \leq 0.7$ 时,也能得到相当好的效果;当 $\frac{x_L}{R} \geq 2$, 但 $\cos \varphi_2 = 0.9 \sim 0.95$ 时,也能改善电压。

§ 1.2 串联电容补偿与并联电容补偿的比较

下面从改善电压水平、提高功率因数及减少线路有功损失三个方面,对串联电容补偿与并联电容补偿的作用作一比较。

1. 改善电压水平

假定受端负荷 $P - jQ$ 及送端电压 U_1 保持不变。当受端装有容量为 Q_b 的并联电容器时,线路电压损失减少的数值近似为:

$$\Delta U_b = \frac{Q_b x_L}{U_2''} \quad (1.2-1)$$

如果用线路受端的短路容量 S_d 来表示线路电抗时,即 $x_L = \frac{U_2''^2}{S_d}$ 时,则上式可写成:

$$\Delta U_b = \frac{Q_b U_2''}{S_d} \quad (1.2-2)$$

在相同条件下,当线路上接入容抗为 x_c 的串联电容器时,线路电压损失较补偿前减少的数值近似为:

$$\Delta U_c = \frac{Q x_c}{U_2'} \quad (1.2-3)$$

如果用串联电容器的容量 Q_c 来表示 x_c 时,则

$$x_c = \frac{Q_c}{I_{e,c}^2} = \frac{Q_c}{I^2} = \frac{Q_c K_f^2}{\left(\frac{S}{U_2'}\right)^2} = Q_c K_f^2 \left(\frac{U_2'}{S}\right)^2$$

式中 $I_{e,c}$ ——串联电容器组额定电流

I ——线路实际负荷电流

S ——受端负荷视在功率

K_f ——串联电容器负荷率,即 $I/I_{e,c}$,

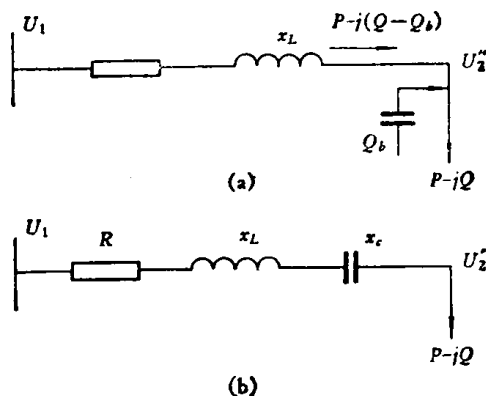


图 1.2-1 装有并联或串联补偿装置的配电网等值电路图

则(1.2-3)式可写成:

$$\Delta U_o = \frac{Q Q_o K_f^2 U'_2}{S^2} \quad (1.2-4)$$

当 $\Delta U_b = \Delta U_o$ 时, 即两种不同补偿方式得到相同的调压效果时, 则有(这时 $U'_2 = U'_2$):

$$\frac{Q_o}{Q_b} = \frac{S}{S_d} \cdot \frac{S}{Q} \cdot \frac{1}{K_f^2} \quad (1.2-5)$$

一般情况下, $\frac{S}{S_d} = 0.1 \sim 0.15$; $\frac{S}{Q} = 1.67$ ($\cos \varphi = 0.8$). 若取 $K_f = 0.8$, 则:

$$Q_o = (0.26 \sim 0.39) Q_b \approx \left(\frac{1}{4} \sim \frac{2}{5} \right) Q_b \quad (1.2-6)$$

可见, 为了达到同样的调压要求, 通常串联电容器容量仅为并联电容器容量的 $1/4 \sim 2/5$. 另外, 串联电容补偿的调压作用是连续的, 能随负荷变化而自动改变调压能力, 因而减少了受端电压的波动. 所以, 配电网中用串联电容补偿来改善电压水平, 要比并联电容补偿优越.

2. 提高送端功率因数

如果在线路上采用串联电容补偿, 电容器容量为 Q_o , 容抗为 x_o , 则受端从串联电容获得的无功功率如下.

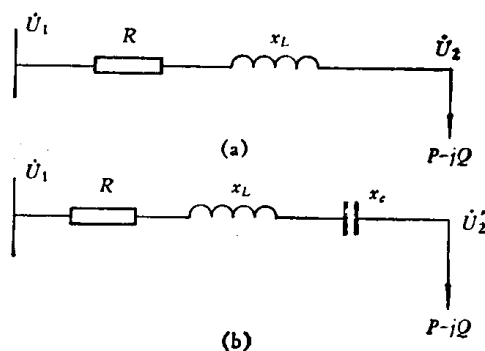


图 1.2-2 等值电路图

假定送端电压 U_1 及输送功率 $P - jQ$ 为恒定值. 若以 U_1 为实轴, 则补偿前的线路受端功率为:

$$\begin{aligned} \bar{S}_2 &= I \dot{U}_2^* = \frac{P - jQ}{\dot{U}_1} \cdot \dot{U}_2^* \\ &= \frac{P - jQ}{U_1} \left[U_1 - \frac{(P + jQ)(R - jx_L)}{U_1} \right] \\ &= (P - jQ) - \frac{P^2 + Q^2}{U_1^2} (R - jx_L) \end{aligned} \quad (1.2-7)$$

补偿后的线路受端功率为:

$$\bar{S}'_2 = I \dot{U}'_2^* = \frac{P - jQ}{\dot{U}_1} \cdot \dot{U}'_2^* = (P - jQ) - \frac{P^2 + Q^2}{U_1^2} (R - jx_L + jx_o) \quad (1.2-8)$$

所以, 补偿前后受端功率的变化为:

$$\Delta \bar{S}_2 = \bar{S}'_2 - \bar{S}_2 = -j \frac{P^2 + Q^2}{U_1^2} x_o = -j I^2 x_o \quad (1.2-9)$$

式中 I ——线路电流

上式即为受端从串联电容获得的无功功率.

当串联电容器满负荷时, 即 $I = I_{o.c}$ 时,

$$|\Delta \bar{S}_2| = Q_o$$

可见, 这时串联电容器的无功容量全部出现于末端, 其效果与并联补偿是一样的.

但是, 线路电流 I 一般小于串联电容器组的额定电流 $I_{o.c}$, 所以在受端得到的无功功率通常小于 Q_o . 另外, 受端并联补偿装置供给的无功功率不通过线路, 而串联补偿(当串联补偿不是装在线路受端时)供给受端的无功功率要通过线路, 因而增加了线路的有功及无功损失. 所以, 在补偿容量相等时, 即 $Q_b = Q_o$ 时, 就增加了系统的无功功率. 可见, 就提高线路送端功率因数的效果而言, 并联补偿较为优越.

3. 减少线路有功损失

因为并联电容补偿能使通过线路的电流减少,所以在一般情况下,并联补偿对减少线路有功损失的作用较串联补偿显著.这可由下述分析近似地加以证明.在分析中假定送端电压 U_1 及受端负荷 $P-jQ$ 保持不变,如图 1.2-1 所示.

在串联补偿电容器的容量为 Q_c 时,根据式(1.1-11)及(1.1-7)可知,串联补偿后所减少的线路有功损失为:

$$\Delta P_c = \frac{2Qx_c \cdot \Delta P}{(U_2')^2} = \frac{2Qx_c}{(U_2')^2} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_2'^2} \cdot R = \frac{2RQ}{(U_2')^2} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_2'^2} x_c = \frac{2RQ}{(U_2')^2} \cdot I^2 x_c \quad (1.2-10)$$

式中 U_2 ——无补偿时的受端电压

U_2' ——串联补偿后的受端电压

I ——线路电流

令 $I = I_{e.c} K_f$ [K_f 为串联电容器负荷率,与式(1.2-4)相同],则:

$$\Delta P_c = \frac{2RQ}{(U_2')^2} \cdot K_f^2 I_{e.c}^2 \cdot x_c = \frac{2RQ}{(U_2')^2} \cdot K_f^2 Q_c \quad (1.2-11)$$

如果在受端装上相同容量的并联电容器,即 $Q_b = Q_c$ 时,则线路有功损失较补偿前减少的数值为:

$$\Delta P_b = \frac{P^2 + Q^2}{U_2''^2} R - \frac{P^2 + (Q - Q_c)^2}{(U_2'')^2} R$$

式中 U_2'' ——并联补偿后的受端电压

运用与 § 1-1 所述的同样简化方法可求得:

$$\Delta P_b = \frac{2Q_c R}{U_2^2 \cdot U_2''^2} \left\{ \left(Q - \frac{Q_c}{2} \right) [U_1^2 - 2(PR + Qx_L)] + (P^2 + Q^2)x_L \right\} \quad (1.2-12)$$

式中

$$U_1^2 - 2(PR + Qx_L) \approx U_2^2$$

$$(P^2 + Q^2)x_L = U_2^2 \cdot \frac{(P^2 + Q^2)}{U_2^2} x_L = U_2^2 \cdot \Delta Q$$

$$\therefore \Delta P_b = \frac{2Q_c R}{(U_2'')^2} \left(Q + \Delta Q - \frac{Q_c}{2} \right) \quad (1.2-13)$$

为了比较 ΔP_c 与 ΔP_b , 我们假定 $K_f = 1$, 即串联电容器满负荷. 这样, 当 $\Delta Q > \frac{Q_c}{2}$ 时, 即 $K_c = \frac{x_c}{x_L} < 2$ 时, 在补偿电容器容量相等的情况下, 并联补偿对减少线损的作用较为显著, 只有当 $K_c > 2$ 时才能得到相反的结果; 而且在大多数情况下, $K_f < 1$, 因此, 串联补偿对减少线损的作用要更差一些.

通过上述分析, 大致可以得出这样的结论: 当以改善电压水平为主要目的时, 以采用串联补偿为宜; 而当以提高功率因数、减少线损为主要目的时, 则以采用并联补偿为宜.

在某些情况下, 可以将同一补偿装置设计成串并联两用, 以更好地发挥电容器的效益.

§ 1.3 串联电容补偿装置安装点的选择

选择串联电容补偿装置在线路上的安装点时, 主要应考虑下面几个因素:

- (1) 保证沿线各负荷点的电压水平。
- (2) 尽量减少各负荷点的电压对额定电压的偏移,使全线电压分布尽量均匀。
- (3) 减少短路电流对电容器的冲击。
- (4) 为了运行维护方便,一般将串联电容补偿装置安装在有人值班的变电所内。

在单端供电的配电线路上,当负荷全部集中在线路末端时,从改善受端电压水平的角度来看,补偿装置放在线路上任何一点都是一样的。但由于线路上发生短路故障的机会

较多,为了减少短路电流对电容器的冲击,补偿装置一般应装在受端变电所内。

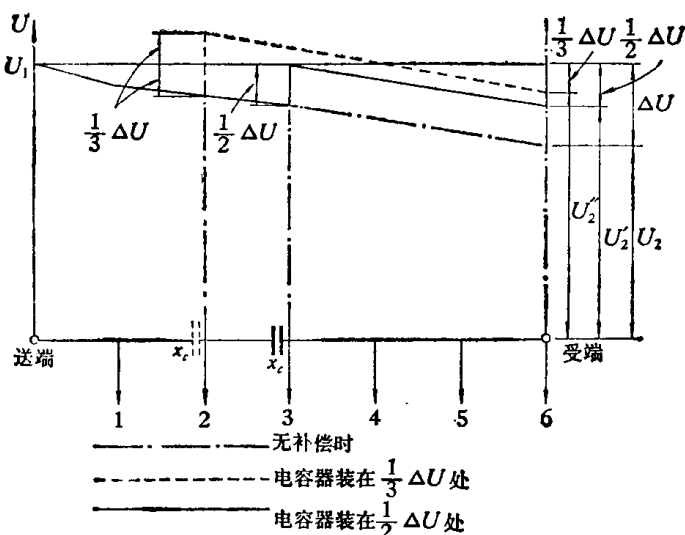


图 1.3-1 配电线路具有若干个负荷点时的电压分布图

沿配电线路接有若干个负荷时,在确保各负荷点(特别是末端)电压水平的前提下,可以这样选择电容器安装点(参阅图 1.3-1): (a) 如送端电压基本上保持不变,同时又不希望沿线任意点的电压高于送端电压时,可将串联电容器装在全线压降的 1/2 处,并按电容器后面第一个负荷点的电压等于送端电压来选择 x_c ; 这样可使线路末端压降

及电压波动减少一半,沿线其余各点的电压水平也相应得到改善; (b) 如允许串联电容器后面的电压高于送端电压,那么将串联电容器装于全线压降的 1/3 处,能使沿线各负荷点的电压偏移为最小,这时串联电容器补偿全线压降的 2/3,因而电容器后面第一个负荷点的电压比送端电压高出全线压降值的 1/3,而末端压降仅为补偿前的 1/3。

当用户有较大容量的交流电动机时,串联电容补偿可能引起自激。如果有大电动机的用户不在线路末端,则可以用适当改变电容器安装点的方法来避免自激。如图 1.3-2,假定负荷点“2”有大型电动机。若负荷点“2”的电压水平不需要补偿,则可将串联电容器装在点“2”后面;若负荷点“2”的电压水平必须补偿,则可将串联电容器分别安装在点“2”前后,即分设两个串联补偿站,这样可以降低大型电动机所联线路的补偿度,以减少电动机发生自激的可能性。

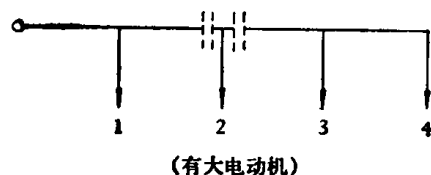


图 1.3-2 用户有大电动机的配电线路中电容器安装点的选择

§ 1.4 串联电容补偿装置容量的计算

对于图 1.4-1(a) 所示的配电线路,在送端电压 U_1 与受端功率 $P-jQ$ 已知的情况下,为了满足要求的线路末端电压值 U_2 ,根据 1.4-1(b) 所示的向量图可知,串联补偿装置的容抗值 x_c 应能满足下述关系式:

$$U_1 = \sqrt{\left[U_2 + \frac{PR + Q(x_L - x_c)}{U_2} \right]^2 + \left[\frac{P(x_L - x_c) - QR}{U_2} \right]^2} \quad (1.4-1)$$

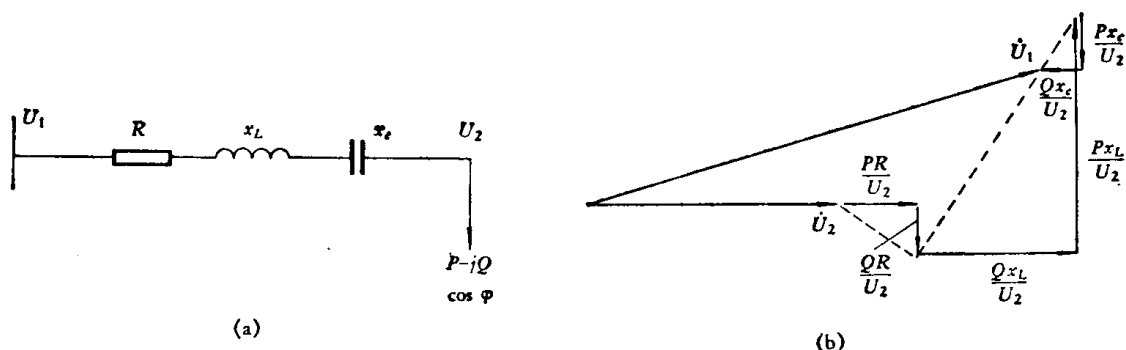


图 1.4-1 配电线路等值结线图及电压向量图

上式两边平方并整理后可得:

$$\begin{aligned}
 & (Q^2 + P^2)(x_L - x_0)^2 + 2U_2^2 Q(x_L - x_0) + U_2^4 - U_1^2 U_2^2 + 2U_2^2 PR + R^2(Q^2 + P^2) = 0 \\
 \therefore x_L - x_0 &= \frac{-2U_2^2 Q + \sqrt{4U_2^4 Q^2 - 4(Q^2 + P^2)[U_2^4 - U_1^2 U_2^2 + 2U_2^2 PR + R^2(P^2 + Q^2)]}}{2(Q^2 + P^2)} \\
 &= \frac{-2U_2^2 P \operatorname{tg} \varphi + \sqrt{-4U_2^4 P^2 - 4 \frac{P^2}{\cos^2 \varphi} (-U_1^2 U_2^2 + 2U_2^2 PR + R^2 P^2 / \cos^2 \varphi)}}{2P^2 / \cos^2 \varphi} \\
 &= \frac{-2U_2^2 P \operatorname{tg} \varphi + 2P / \cos^2 \varphi \sqrt{U_1^2 U_2^2 \cos^2 \varphi - U_2^4 \cos^4 \varphi - 2U_2^2 PR \cos^2 \varphi - P^2 R^2}}{2P^2 / \cos^2 \varphi} \\
 &= \frac{1}{P} (U_2^2 \sin \varphi \cos \varphi - \sqrt{U_2^2 \cos^2 \varphi (U_1^2 - U_2^2 \cos^2 \varphi) - PR(PR + 2U_2^2 \cos^2 \varphi)})
 \end{aligned}$$

故

$$x_0 = x_L + \frac{1}{P} [U_2^2 \sin \varphi \cos \varphi - \sqrt{U_2^2 \cos^2 \varphi (U_1^2 - U_2^2 \cos^2 \varphi) - PR(PR + 2U_2^2 \cos^2 \varphi)}] \quad (1.4-2)$$

式中 U_1 、 U_2 ——送端及受端电压, 伏

P ——受端有功功率, 瓦

R 、 x_L ——线路电阻及感抗, 欧

$\cos \varphi$ ——受端功率因数

如果不计电压降的横分量, 则上式可简化为:

$$x_0 = x_L + \frac{1}{P} [U_2(U_2 - U_1) \operatorname{ctg} \varphi + PR \operatorname{ctg} \varphi] \quad (1.4-3)$$

对于沿线有若干个负荷点的配电线路, 直接应用式(1.4-3)不大方便。这时可根据各负荷点的电压要求, 经电气计算后, 确定电容器安装点、并求出需串联电容器补偿的电压损失 ΔU , 亦即求出电容器前的电压 U_q 与电容器后的电压 U_h ($U_h - U_q = \Delta U$), 然后求出 x_0 。这时可令(1.4-3)式中: $U_1 = U_q$ 、 $U_2 = U_h$ 及 $R = 0$ 、 $x_L = 0$ 。因此得出:

$$x_0 = \frac{1}{P} U_h (U_h - U_q) \operatorname{ctg} \varphi = \frac{U_h (U_h - U_q)}{Q} = \frac{U_h \cdot \Delta U}{Q} \quad (1.4-4)$$

式中 U_h ——串联电容器后面的线路电压, 千伏

ΔU ——需要补偿的电压, 伏

Q ——通过线路(电容器安装处)的无功功率, 千乏

式(1.4-4)是设计串补站时最常用的公式。

根据求出的 x_c 值及线路负荷电流值, 即可求出每相电容器组的串并联台数及三相电容器组的总容量。假定线路负荷电流为 I , 每台电容器额定电流为 $I_{e.o}$, 每台电容器容抗为 $x_{e.o}$, 则可求出每相电容器组并联台数 n_b 及串联台数 n_c 分别为:

$$n_b = \frac{I}{I_{e.o}} \quad (1.4-5)$$

$$n_c = \frac{n_b x_c}{x_{e.o}} \quad (1.4-6)$$

串联电容器组的三相总容量为:

$$Q_c = 3n_b \cdot n_c \cdot Q_{e.o} \quad (1.4-7)$$

式中 $Q_{e.o}$ ——单台串联电容器额定容量

应当注意, 当采用并联阻抗的措施来克服交流电动机自激时(见第二章及第四章), 通

过串联电容器组的电流 I_c 将大于线路负荷电流 I 。如图 1.4-2, 设并联阻抗 R_b 与 $x_{L.b}$ 之值为:

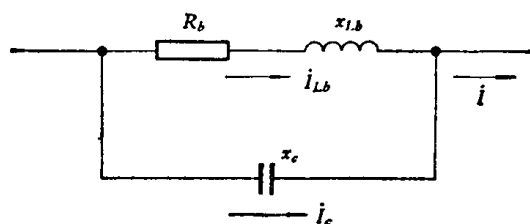


图 1.4-2 加装并联阻抗时的电路图

$$R_b = k_R x_c$$

$$x_{L.b} = k_L x_c$$

一般 $1 < k_R \ll k_L$ 。如果忽略电阻 R_b , 则

$I_{L.b}$ 与 I_c 间的相位差为 180° , 即正好反方向, 故应满足:

$$I = I_c - I_{L.b}$$

而

$$I_{L.b} = \frac{I_c}{k_L},$$

$$\therefore I_c = \frac{I}{1 - \frac{1}{k_L}} \quad (1.4-8)$$

比如, 当 $k_L = 10$ 时, $I_c = \frac{I}{0.9} \approx 1.1I$ 。这时每相电容器组的并联台数 n_b 应该用 I_c 进行校验。

例 1: 某一 35 千伏的配电线路, 其等值线路图如图 1.4-3。补偿前, 中间负荷点的电压为 34.4 千伏, 末端电压为 30 千伏, 要求通过补偿措施将末端电压提高至 33 千伏, 求串联电容器容量。

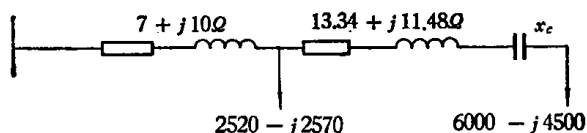


图 1.4-3 某 35 千伏线路等值电路图

解: 因为中间负荷点的电压水平不需补偿, 为了减小串补站容量及减少短路电流对电容器冲击的机会, 将串联电容器安装在末端变电所内。

需要补偿电压为:

$$\Delta U = 33 - 30 = 3 \text{ (千伏)}$$

每相所需容抗为:

$$x_c = \frac{U_n \cdot \Delta U}{Q} = \frac{35 \times 3000}{4500} = 23.3 \text{ (欧)}$$

线路电流为:

$$I = \frac{\sqrt{6000^2 + 4500^2}}{\sqrt{3} \times 35} \approx 123 (\text{安})$$

假定选择 CY1-20-1 型电容器, 其额定电流为 $I_{e.c} = 20 (\text{A})$, 每台电容器容抗为 $x_{e.c} = 50.5 (\Omega)$, 则每相串、并联合数为:

$$n_b = \frac{I}{I_{e.c}} = \frac{123}{20} = 6.15, \text{ 取 } 7 \text{ 台};$$

$$n_c = \frac{n_b x_c}{x_{e.c}} = \frac{7 \times 23.3}{50.5} = 3.23, \text{ 取 } 4 \text{ 台}.$$

三相电容器组总台数为 $3 \times 7 \times 4 = 84 (\text{台})$, 总容量为 $84 \times 20 = 1680 (\text{千乏})$.

在 §1.1 中曾经指出, x_c 越大, 改善受端电压的作用越大, 但这种作用只限于一定的范围内, 不能要求串联电容补偿无限制地提高线路受端电压. 这可用图 1.4-4 的电压向量图加以说明. 当受端负荷 $P - jQ$ 保持不变时, 随着 x_c 的不断增大, $\dot{U}_1$ 向量将沿 BA 线向下移动, 当 $\dot{U}_1$ 与 BA 线垂直时, U_1 达最小值, 亦即线路压降达最小值, 与此对应的 x_c 值即为极限值 $x_{c.\max}$. 当 x_c 继续增大时, 线路压降反而随之增加, 不能达到改善受端电压的目的. $x_{c.\max}$ 的值可利用下式求出:

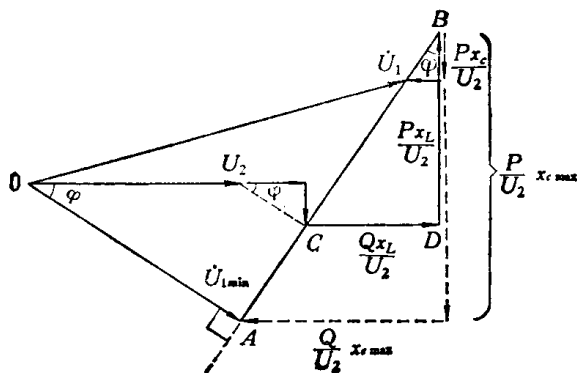


图 1.4-4 串联补偿后的电压向量图

当 $\dot{U}_1$ 与 BA 线垂直时, 电容器组两端承受之电压为:

$$\begin{aligned} U_c = I x_{c.\max} &= \frac{Q}{U_2 \sin \varphi} \cdot x_{c.\max} = \overline{AB} = \overline{AC} + \overline{CB} = U_2 \sin \varphi + \frac{1}{\sin \varphi} \cdot \frac{Q x_L}{U_2} \\ \therefore x_{c.\max} &= \frac{U_2}{Q} \sin \varphi \left(U_2 \sin \varphi + \frac{1}{\sin \varphi} \cdot \frac{Q x_L}{U_2} \right) \\ &= \frac{U_2^2}{Q} \sin^2 \varphi + x_L = x_L + \frac{U_2^2}{P} \sin \varphi \cos \varphi \end{aligned} \quad (1.4-9)$$

对应于上述 $x_{c.\max}$ 值的串联电容器极限容量为:

$$\begin{aligned} Q_{c.\max} &= \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} \cdot x_{c.\max} = \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} x_L + \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} \cdot \frac{U_2^2}{P} \sin \varphi \cos \varphi \\ &= \Delta Q + \frac{P^2 + Q^2}{P} \cdot \frac{Q}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \cdot \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \Delta Q + Q \end{aligned} \quad (1.4-10)$$

可以看出, 串联电容器的极限容量 (指电容器组通过线路电流时、实际发出的无功功率, 不是其安装容量) 等于线路无功负荷及无功损耗之和.

§ 1.5 串联电容补偿装置的主结线

串联电容补偿装置的主结线基本上可以分为两类: 装有旁路断路器的结线和不装旁路断路器的简化结线.

装有旁路断路器的主结线如图 1.5-1.

图中各主要元件的作用如下:

FJ ——放电间隙。主要作用是保护电容器组免受过电压危害。电容器组的过电压是由短路故障、铁磁谐振及自激等原因引起的。

DL ——旁路断路器。主要作用有两方面：一方面是用以投入和切除电容器组（ DL 开断时电容器投入； DL 合上时电容器切除）；另一方面是当保护间隙击穿，但不能自动灭弧时（非自灭弧型间隙），由电流互感器 LH_1 发出信号，通过继电保护装置合上旁路断路器，以使间隙灭弧。旁路断路器合上后，还可自动重跳一次，以便在短路故障消除后，重新投入电容器组。若保护间隙为自灭弧型时，则旁路断路器只起投入和切除电容器组的作用。

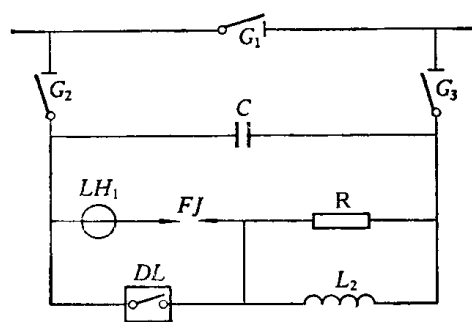


图 1.5-1 有旁路断路器的主结线

G_1 、 G_2 、 G_3 ——隔离开关。在这种结线系统中，隔离开关不担负投入和切除电容器组的任务，仅作为串联补偿装置停电检修时、隔离电源及分路之用。

R 、 L_2 ——阻尼电阻与阻尼电抗。在放电间隙击穿和旁路断路器合闸时，电容器组将对间隙回路或断路器回路放电。由于放电回路电阻很小，电容器将以高频、大幅值且衰减缓慢的周期性电流放电，这对电容器本身以及放电回路中其它设备都很不利。因此，在放电回路中接入阻尼电阻 R 。 R 的作用是限制电容器放电电流幅值，以及消耗放电能量，使放电电流很快衰减。 L_2 的作用是为了降低旁路断路器合闸时工频负荷电流通过 R 时的有功损失。适当选择 R 与 L_2 的比例，可使工频负荷电流主要从电抗中流过，而电容器高频放电电流主要从电阻中流过。

上述结线在运行上比较灵活，但设备和投资较多，占地面积较大，增加了串联补偿站的复杂性，影响了串联补偿技术的推广应用。这就提出了进一步简化串联补偿装置主结线的要求。在简化主结线的过程中，在我国，主要解决了下述两个问题：

(1) 用自灭弧型磁吹间隙代替非自灭弧型普通石墨球间隙。在短路故障消除后仍流过线路负荷电流的情况下，这种间隙能自行灭弧，无需由旁路断路器合闸来灭弧。

(2) 用隔离开关代替旁路断路器来实现投入和切除电容器组的操作。

采用简化结线后，除取消了旁路断路器外，也相应地取消了与旁路断路器有关的不少一、二次设备，如平衡保护、低次谐波保护、过负荷保护、自动重跳等装置。

简化结线基本上可分为如图 1.5-2 与图 1.5-3 所示的四隔离开关式与三隔离开关式两种（下面简称四刀式与三刀式）。

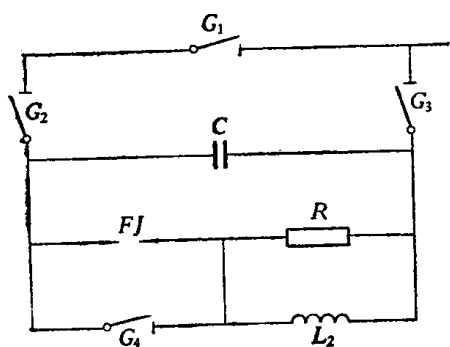


图 1.5-2 四刀式简化结线

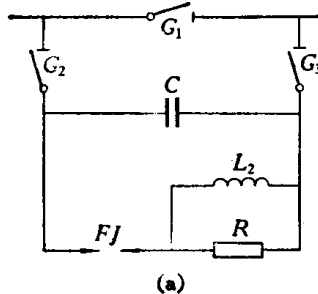
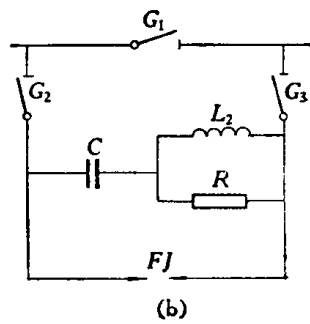


图 1.5-3 三刀式简化结线



在四刀式结线中,用隔离开关 G_4 代替旁路断路器进行投入与切除电容器组的操作;在三刀式结线中,则用隔离开关 G_1 来进行这种操作。

三刀式结线中,可将阻尼元件接于间隙回路,如图 1.5-3(a) 所示;也可将阻尼元件接于电容器回路,如图 1.5-3(b) 所示。阻尼元件接于间隙回路时,其缺点是在 G_1 合闸切除电容器组时,电容器组对 G_1 回路放电,没有阻尼元件限制其放电电流。这就加重了串联电容器及隔离开关 G_1 的工作条件。阻尼元件接于电容器回路时,克服了上述缺点,但正常运行时线路负荷电流在阻尼电阻中造成了一些能耗。

目前国内 110 千伏串联补偿装置多采用四刀式简化结线,而 35 千伏串联补偿装置多采用三刀式结线。

采用上述简化结线后,在正常操作投入电容器组时,由隔离开关切断负荷电流;而在短路故障消除后、自动投入电容器组时,由自灭弧型保护间隙灭弧来切断负荷电流。应当注意,隔离开关的断流能力和保护间隙的灭弧能力与线路负荷电流大小、电容器组恢复电压*高低等有关。对于某些大容量的 110 千伏串联补偿装置,由于负荷电流大、恢复电压高,隔离开关断流能力和保护间隙灭弧能力可能满足不了要求。这时就需对上述简化结线作某些改进。

为了解决旁路隔离开关断流能力不够的问题,可采用 10 千伏跌开式旁路熔断器和通过辅助触头与 110 千伏旁路隔离开关触头相并联的方案;其具体接法如图 1.5-4 所示,旁路隔离开关辅助触头如图 1.5-5 所示。

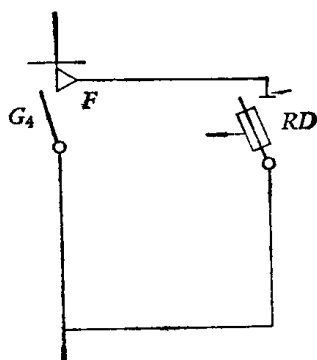


图 1.5-4 熔断器 RD 通过辅助触头 F 与隔离开关 G_4 并联

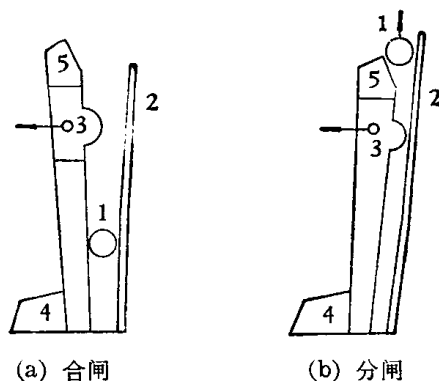


图 1.5-5 旁路隔离开关辅助触头

旁路熔断器一端通过辅助触头 F 与旁路隔离开关静触头连接,另一端接至隔离开关动触头。在旁路隔离开关分闸过程中,当动触头 1 即将与静触头 2 脱离接触时,辅助触头 3 (铜钨合金)靠弹簧片 4 (1 毫米厚的磷铜片)、辅助触头支持杆 5 (环氧酚醛玻璃布板)与静触头消弧杆 2 接触。这样,当隔离开关动触头与静触头脱离接触前,电流已开始转移至熔断器,从而使隔离开关的分闸过程不产生电弧,而由旁路熔断器来切断负荷电流,投入电容器组。在旁路隔离开关处于合闸状态时(电容器组退出运行),靠隔离开关动触头与支持杆的弹性使辅助触头与静触头消弧杆保持一定距离。

为了适应切断负荷电流,跌开式熔断器本身也应作相应的改制:熔管采用有机玻璃管,内径减小至 7 毫米,以增强切断小电流时的充气压力,提高介质强度的恢复速度;管

* 恢复电压:电容器组恢复电压指隔离开关切断间隙灭弧时,电容器两端的暂态电压(稳态分量与自由分量之和)。如果忽略阻尼电阻上的电压,则电容器组恢复电压即可近似认为等于间隙或旁路隔离开关两端的恢复电压。