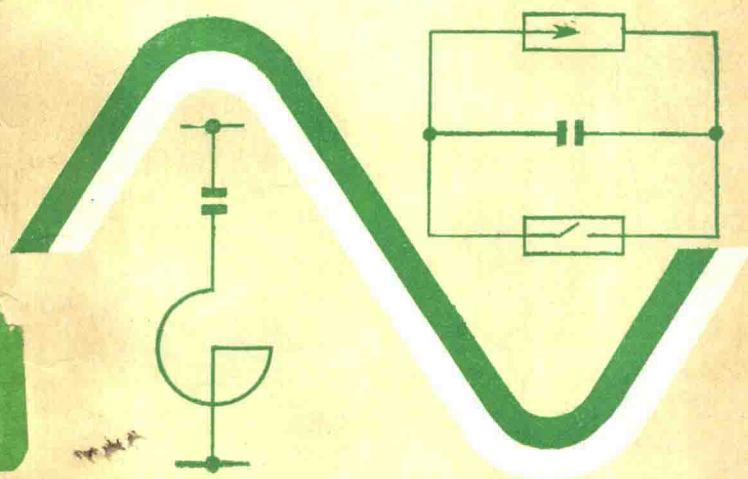


DIANRONG BUCHANG ZHUANGZHI

电容补偿装置



中国铁道出版社

电 容 补 偿 装 置

〔苏〕 巴·米·巴拉杜宁 著
列·阿·格尔曼

张进思 何洪涛 袁则富 译
袁则富 审校

中 国 铁 道 出 版 社

1982年·北京

内 容 简 介

本书较全面地介绍了苏联牵引供电系统中的无功、负序、谐波和电压的综合补偿问题，并结合电力牵引负荷的特点研究了串联和并联电容补偿装置对减少电能损失、改善电压质量和降低电流电压不对称的技术经济效果，分析了电容装置在牵引供电系统中引起的谐振现象以及装置中的暂态过程。特别是对电容补偿装置的容量计算方法、保护方式、设置地点的选择原则和运行维修等问题作了较详细的分析。

本书可供从事供电系统的研究、设计人员、有关工程技术人员以及大专院校有关专业的师生参考之用。

Конденсаторные Установки
Электрифицированных Железных
Дорог Переменного Тока

电 容 补 偿 装 置

张进思 何洪涛 袁则富译

袁则富 审校

中国铁道出版社出版

责任编辑 张余昌

封面设计 翟 达

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{4}$ 印张：5.5 字数：120千

1982年2月第1版 1982年2月第1次印刷

印数：0001—6,000册 定价：0.60元

译者序

随着国民经济的日益发展，用电负荷不断增长。铁路牵引动力也正在向着电力牵引的方向发展。合理解决电气化铁道牵引供电系统以及电力工业电力系统中的无功、负序、谐波和电压的综合补偿问题，减轻单相牵引负荷对外部供电系统的不利影响，对进一步提高系统运行的技术经济指标，有着重要的意义。

对于上述综合补偿问题，我国过去在有关单位的努力下，也做过一些工作（理论分析和现场运行试验），但总的来说，要比较全面而又合理的解决这方面的问题，还有不少工作需要做。为配合这方面的工作，我们特翻译了“电容补偿装置”一书，该书比较集中而又全面地分析和总结了有关牵引供电系统中的串、并联电容补偿装置问题，因此对我们会有一定的参考价值。

由于译者的业务水平有限，加之翻译时间紧迫，因此，在译文中难免有不妥和错误之处，望读者给予指正。本书的第一、二、三章由张进思翻译，第四、五、六章由何洪涛翻译，第七、八章由袁则富翻译，全书由袁则富同志审校。

译者

一九八〇年十二月

科技新书目 12—99

统一书号: 15043·5230

定 价: 0.60 元

目 录

第一章 电容装置的用途	1
§ 1 交流电气化铁道牵引负荷及电压的基本特性	1
§ 2 不可调与可调的并联电容补偿装置	9
§ 3 串联电容补偿装置的结线图	14
第二章 用电容装置提高电力牵引的动力指标	19
§ 4 无功功率的补偿	19
§ 5 有功功率损失的减小	21
§ 6 牵引网电压状况的改善	29
§ 7 电流和电压不对称的降低	42
§ 8 有串联电容补偿装置时, 牵引网中的均衡电流	51
第三章 电容装置运行时的谐振现象	55
§ 9 供电系统中的电流和电压波形	55
§ 10 高次谐波电流的放大	57
第四章 电容装置容量的计算	65
§ 11 并联电容补偿装置容量的计算和设置地点的选择	65
§ 12 并联电容补偿装置电容器数量的确定	80
§ 13 串联电容补偿装置的容量和阻抗的计算	89
第五章 电容装置的暂态过程	94
§ 14 并联电容补偿装置的投入	94
§ 15 并联电容补偿装置的切除	99

§ 16 串联电容补偿装置的暂态过程	102
第六章 电容装置的保护	105
§ 17 并联电容补偿装置的过负荷和 短路电流保护	105
§ 18 并联电容补偿装置的操作过电压保护	115
§ 19 串联电容补偿装置的保护	124
第七章 电容装置的主要设备	131
§ 20 电容装置的设备	131
§ 21 并联电容补偿装置的接线图和设备	141
§ 22 串联电容补偿装置的接线图和设备	147
第八章 电容补偿装置的运行	153
§ 23 运行的可靠性	153
§ 24 安装、检修和预防性试验	155
§ 25 安全技术	163
文献目录	166

第一章 电容装置的用途

§ 1 交流电气化铁道牵引负荷

及电压的基本特性

如所周知，串联和并联电容补偿装置，其型式、容量、参数以及安装位置的选择，主要是由牵引变电所和牵引网的负荷与电压所决定的。牵引负荷波动范围大及其不均衡这些特点决定了在确定上述装置容量时，选定其计算负荷是比较复杂的。在运营中，牵引负荷特性是由3~5个昼夜的统计测量资料来确定的。此时要确定出平均电流、均方根电流（有效电流）和最大电流值。此外还需确定相邻变电所解列这种故障状态下的最大电流。在一定时期内有功电流的平均值很容易从有功电度表的读数来求算。

电气化区段月负荷 A_M （见图1）在一年里相互能相差20~35%。冬季所需的有功和无功功率最大，因此补偿装置的容量应依据此时的负荷来确定。无功功率的平衡也是根据供电量最大月份里的负荷来考虑的。年平均牵引负荷 A_r 在十年里增长了80%（见图1）。我们可以按牵引负荷年增长率的5%这个数值进行计算。

选择串联电容补偿和可调并联电容补偿装置的容量时，需考虑到负荷波动的特点，此特点可用有效系数 $\kappa_{\theta} = I_{\theta} / I_{CP}$ 来表示（式中 I_{θ} 和 I_{CP} 分别为牵引负荷电流的均方根值和平均值）。并联运行的牵引变电所，其供电臂和回流线上的负荷有效系数基本上是1.06~1.15，它随负荷的增长而下降（图2）。单线区段的 κ_{θ} 值要大些。牵引变电所分开供

电时, κ_{Θ} 值照例也是要增大的。

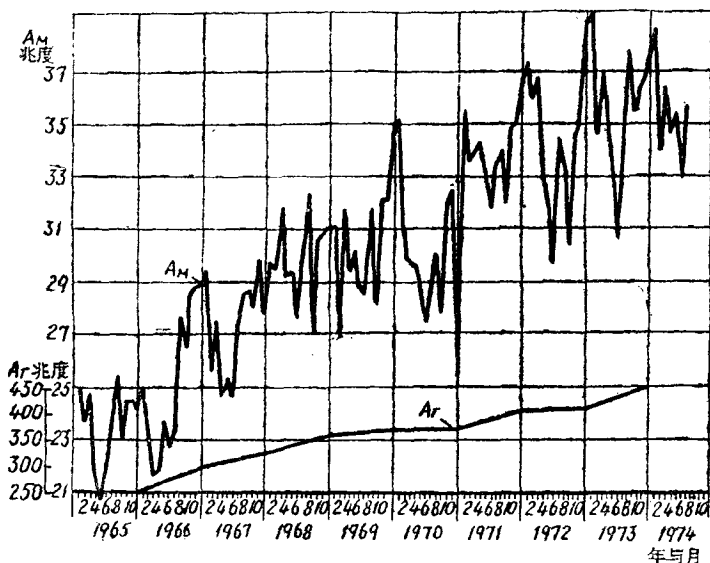


图1 具有六个牵引变电所的电化区段, 其牵引负荷的增长图

给铁路干线区段供电的牵引变电所, 供电臂上的瞬时电流的比值基本上为 $0.3 \sim 3$, 而平均电流的比值 $n_{CP} = 0.8 \sim 1.3$ 。改变供电方式以及因检修工作需对接触网停电, 对昼夜平均负荷比值 n_{CP} 有很大的 K_3 的影响(图3中以点标示的)。

交流接触网分段结线的特点是, 大铁路枢纽站上的牵引变电所, 由同一相上引出两馈线向铁路一个方向(一个臂)供电, 而由另一相引出的其余馈线给另一个

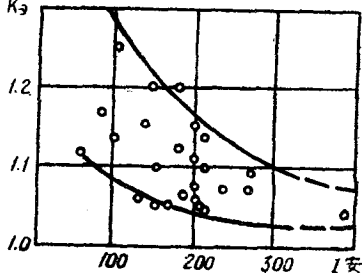


图2 有效系数与负荷的关系

方向的铁路以及所有的站线和机车库供电。因此，这些变电所具有供电臂平均电流相差较大（一般相差50~100%）的特点（见图3，变电所1）。此外，这些变电所带有较大的（2~5兆瓦）地区负荷，而其他变电所的地区负荷则较小（0.2~1兆瓦）。

十分钟的最大负荷与平均电流的比值（称为紧密系数 κ_H ）为1.6~3.5，其中小值对应于大的牵引负荷（在图4上，点表示供电臂负荷的 κ_H ，而符号 $\times$ 则表示回流线负荷的 κ_H ）。

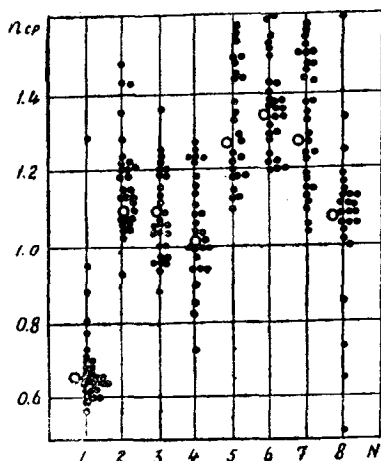


图3 供电臂平均电流比值
○——一个月内测得的 n_{cp} 值。

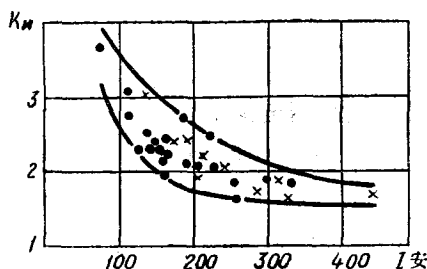


图4 最大负荷和平均负荷的比值

相邻变电所解列时，从理论上来说，供电臂负荷约增大一倍（而在回流线里，约增大60%）。但是在解列时（特别

是按检修作业计划而解列时)总是力求对列车数加以限制,这样就不至在单边供电牵引网的末端引起过大的电压损失。因此实际上供电臂的负荷只会提高0.5~1倍,而在回流线里提高0.3~0.6倍。

运营情况表明,在复线区段因进行线路大修而经历4~8小时的“天窗”之后,并未观察到牵引负荷有很大的增加。这是因为在“天窗”期间,在运用线路的两个方向上仍可开行列车(包括大列)。

牵引负荷经常是用有功功率和功率系数来表示其特征的。它的功率系数用下式来表示。

$$\alpha = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1)$$

在非正弦工作状况下,对于电牵引系统单相供电网中的有功功率

$$P = \sum_{i=1}^{\infty} I_i U_i \cos \varphi_i \quad (2)$$

式中 I_i, U_i ——第 i 次谐波电流和电压值;

φ_i —— I_i 对于 U_i 的相移角。

$$\text{全功率} \quad S = IU, \quad (3)$$

式中 I, U ——非正弦电流和电压的有效值。

通常,变电所的电压波形畸变不大,因此可以认为

$$P = I_1 U_1 \cos \varphi_1$$

式中 U_1, I_1, φ_1 ——分别表示基波电压、电流值和它们之间的相移角。

取牵引变电所的 $U = U_1$, 则由公式 (1), (2), (3) 得

$$\alpha = \nu \cos \varphi_1 \quad (4)$$

式中 $\nu = I_1/I$ ——电流波形畸变系数, 实际上 $\nu = 0.98$ 。

有功功率 P 是用电动式瓦特表来测量的，而电流和电压的有效值是用电动式或电磁式仪表来测量的。将所测得的 P 和 S 值代入公式 (1)，可以相当准确的确定功率系数值。

在运营中，经常用单相电动式相位计直接测量功率系数。应当考虑到，非正弦牵引电流将使得相位计的测量误差约额外地增大 3 %。

由于机车车辆在线路上的移动，工况不断的变化，又因馈电区段内列车数不是固定的，故变电所牵引负荷功率系数是不断变化的〔2〕。在干线区段上，功率系数变化范围比较小，并且当负荷增至 100~200 安以上时就稳定下来了，其有

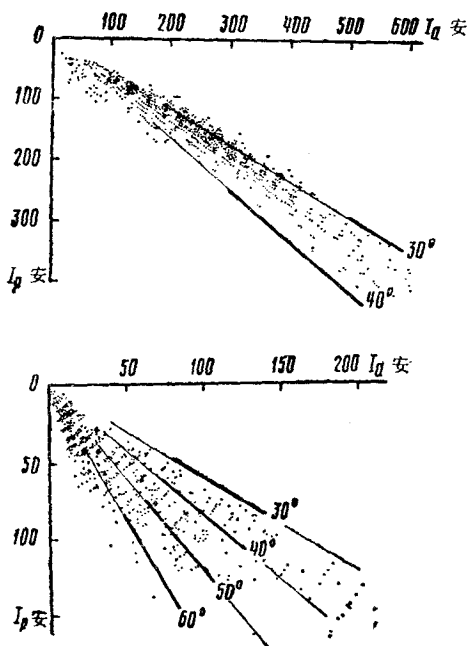


图 5 电流向量末端点的分布

功分量与无功分量之间的关系趋近于一个函数关系（图5，上图，变电所分开供电时所测得的结果）。在这些区段上，功率系数基本上是在0.77~0.87范围内变化，因此，作为工程计算可取 $\alpha = 0.83$ 。

向大枢纽站分支站线、停车场、机车库、编组站等供电的馈电线，其牵引负荷功率系数很低。这是因为站线上的机车在多数情况下，由于频繁起动而要把操纵手把放在低挡位上运行。功率系数若在较大范围（0.3~0.7）内变动（图5，下图）时，在计算中，则通常取0.6左右。具有这样馈线的变电所，大负荷臂的功率系数较低，设计电容装置时应考虑到这一点。

功率系数值较大时，例如装有补偿装置时，用无功功率系数 $\tan \varphi$ 来计算无功功率较为合理，此时 $Q = P \tan \varphi$ 。

可以这样来解释，例如当 $\cos \varphi$ 由0.95变到0.96（增大1%）时， $\tan \varphi$ 值由0.36变到0.30（变化了20%）。因此，当功率因数较大时，用通常的无功计算方法将导致大的误差。此外可以认为， $\cos \varphi$ 为0.95时，其值已很接近于1。此时会认为不消耗无功，而实际上无功量值约为有功的40% [3]。

应直接利用无功功率的大小来解决无功功率的补偿问题。在一般情况下，我们对无功功率的平均值并不感兴趣，而重要的是要知道在一定的牵引网工作状况下（一般是指最大负荷与最小负荷的状况）无功功率的大小（所消耗和发出的无功）。

实际上，重要的是按无功平衡条件来检验某些工况（不是一般的工况而是要特别检验最大无功负荷时的工况），对于电力系统中心变电所无功不足时的工况更需要加以检验。

功率系数加权平均值同样也不能作为一个指标。例如对

于变动的牵引负荷，采用不可调的补偿装置可以达到相当高的加权平均功率系数，但是在最大负荷时，却可能出现无功的不足。因此，我们只能按一定的牵引网工况下的功率系数（无功功率系数）来研究无功补偿问题才是正确的。

采用再生制动使有功功率减少，无功功率增加。结果，功率系数急剧降低。当馈电区段所有机车都处于再生工作状态时，供电臂负荷的功率系数为0.2~0.4。但是，正如采用了再生制动区段运用经验所表明的那样，在最大牵引负荷工况下，由于再生电流在总负荷电流中所占比重不大，故功率系数总共只降低0.02~0.08。

牵引变电所的电压状况。大多数具有自动调压装置的牵引变电所，其母线电压平均为26.5~28千伏，一般不小于25千伏和不大于29千伏。由远距离的110千伏传输线供电的变电所，其电压可能会低一些。由于这些变电所三相电压的不对称度较大，自动调压装置工作困难，并且母线上的电压会降低到24~25千伏。

研究表明，27.5千伏母线电压分布用正态律描述比较正确，因而可在实际计算中加以应用。表征电压波动的电压均方根偏差与变电所至系统的距离有关，其值为0.5~1.2千伏。因此，变电所母线电压相对其平均值的最大偏差为1.5~3.6千伏。

接触网上的电压波动范围比变电所的要更大些。特别应考虑相邻变电所解列这种事故状况，此时母线电压可能降到24~25千伏，而接触网电压则可能降至19~20千伏。有时，恰恰是按这种工况来选定并联和串联补偿装置的。

牵引负荷的不对称引起电压的不对称。对于多数的牵引变电所，不对称系数的均方根值 $\alpha_{\text{н}}$ 不超过《电气化铁道技术标准（HTПЭ-67）》中所规定的5%。其大值将出现在

离电力系统较远、且又是向大的铁路枢纽供电的变电所，因为这种变电所供电臂上的负荷重，且其平均值相差大。对于这样的变电所， α_{ω_0} 值可能达到6%~7%，而最大的不对称系数（具有95%的概率）可能达到10%。通常，给大的铁路枢纽供电或是接触网均由其一相得到供电的变电所，其不对称系数的平均值比向铁路干线区段供电的变电所的要大。电压不对称系数较大（超过5%）时，应考虑能否利用并联电容补偿装置和串联电容补偿装置或其他办法来降低不对称。

牵引负荷的非正弦性导致牵引变电所电压波形的畸变。离系统较远的变电所，27.5千伏母线电压非正弦系数达到8~13%。谐波中以3、5、7次谐波值最大，同时由于在110千伏传输线中存在谐振现象，通常5次谐波值要超过其余所有的谐波值。

在电容装置运用过程中，应对正常和事故状态以及对牵引网最大和最小负荷这种具有代表性的工作状态下的电压状况、牵引负荷和无功潮流进行监督。为此需要预先考虑配备相应的固定式和携带式监视测量仪器。根据测量结果，可以解决电容装置的工况和容量是否需要变动以及是否需要投入新的电容装置这样一些问题。根据牵引负荷不断变化的特点，最好采用能对一段时间内的被测量值进行连续检测的自动记录仪表。所说的一段时间，依据测量的目的，可能是一昼夜或几昼夜，或一星期，而对于有代表性的牵引网工况来说，通常是几个小时。为了对电压进行监测，采用电压质量统计分析仪是比较方便的。利用这种分析仪可以得到电压的直方图。由于电压波形的畸变，在变电所和在牵引网中，电压质量统计分析仪要通过滤波器接入，以便测得基波电压。

为了监测电压的非正弦性，可以采用携带式谐波分析仪，这种分析仪能测得各高次谐波的有效值。谐波分析仪所

得结果可在自动记录仪表上记录下来。当由电抗器的电感和电容器的电容所组成的并联补偿装置回路失谐、或相应的谐波出现谐振时，谐波分析仪的测量值就急剧增大。如果需要确定是哪次谐波在补偿装置中发生谐振，那就应该利用示波器或特殊的仪器——低频谐波分析仪来确定。

为了测量电压的非对称性，采用了负序滤序器，该滤序器的出端通过调谐到 5 次谐波的滤波器插座与自动记录仪表相连。

用单相有功电度表能很容易计算出供电臂上的有功能耗。有功电度表同样也可用来测量单相网中的无功，但此时要通过串接的电容器和电阻器将接至电度表电压线圈上的电压相移 90° 。

在某些并联补偿装置上，为了某种技术的目的，对所发出的无功，是用有功电度表来测量的，此时电度表的电压线圈经过互感器接至补偿装置的母线，而电流线圈则是通过补偿装置开关上的联锁接点与电阻相连。

§ 2 不可调与可调的并联 电容补偿装置

并联电容补偿装置主要是用来补偿牵引网的无功功率。并联补偿装置可安装在变电所和牵引网上任一点，同样也可安装在机车上。当并联电容补偿装置安装在机车上时，无功功率直接在“用户”（机车）处被补偿掉，但是此时并联电容补偿装置的安装容量利用得很不好，因为并非所有的机车，也并非全部的时间都在运行中。补偿装置安置在变电所可以更充分地利用并联补偿装置的安装容量。补偿无功的并联补偿装置，当同时又被用来降低负序，提高电压和降低电流、电压的谐波分量时，就能取得最大的经济效果。

为了补偿正序电流的无功，并联电容补偿装置不论接在哪一相上都是一样的。但是为了补偿负序电流以及根据两供电臂上的电流平均值之比使电流和电压趋于对称，则并联电容补偿装置需要安置在一定的相位上。在变电所通常是采用单相并联电容补偿装置，并将它们安置在滞后相上。当两供电臂负荷相等时，单相电容补偿装置在降低负序上可取得最大的效果（见图 6，a）。当变电所两供电臂负荷的平均值相差悬殊时，将并联电容补偿装置安置在两相上较为合理。如超前相的负荷大于滞后相的负荷则安置在滞后相和超前相（图 6，b）；在相反的情况下（滞后相的负荷较大），并联电容补偿装置应接到滞后相和自由相上（图 6，c）。选择并联电容补偿装置接线图时，可用图 7 所示的曲线进行初选。图中依据牵引负荷平均功率 S 和两供电臂负荷平均电流的比值 $n_{CP} = I_{ON}/I_{OT}$ (I_{OT} ——滞后相臂电流； I_{ON} ——超前相臂电流)，可确定出何时在变电所接入单相并联电容补偿装置（2 区）和两相并联补偿装置（1 区——装置接在滞后相和自由相；3 区——装置接在滞后相和超前相）。为了准确地确定并联补偿装置的容量及安装地点，在第四章中对其计算方法进行了研究。

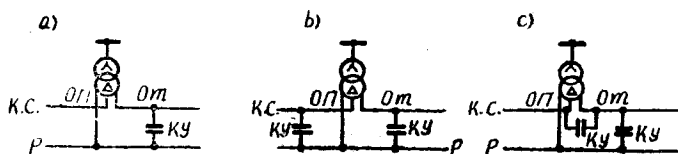


图 6 并联电容补偿装置接至变压器牵引绕组的相位接线图

a, b, c——分别对应于接在滞后相；滞后相和超前相；滞后相和自由相。

KY——并联电容补偿装置；K.C.——接触网；P——钢轨；ON——超前相；om——滞后相。