

我国电力电容器 技术进步方向初探

周存和 著

广西科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

我国电力电容器技术进步方向初探 / 周存和著. —
南宁: 广西科学技术出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-5551-0540-4

I. ①我… II. ①周… III. ①电力电容器—研究—中国 IV. ①TM531.4

中国版本图书馆CIP数据核字 (2015) 第 305379 号

WOGUO DIANLI DIANRONGQI JISHU JINBU FANGXIANG
CHUTAN

我国电力电容器技术进步方向初探

周存和 著

策划编辑: 饶 江

责任编辑: 饶 江

责任校对: 陈庆明

责任印制: 陆 弟

装帧设计: 蒙 晨

出 版 人: 韦鸿学

出版发行: 广西科学技术出版社

社 址: 广西南宁市东葛路 66 号 邮政编码: 530022

网 址: <http://www.gxkjs.com>

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 广西大华印刷有限公司

地 址: 广西南宁市高新区科园路 62 号

邮政编码: 530007

开 本: 787 mm×1092 mm 1/32

字 数: 61 千字 印 张: 4

版 次: 2015 年 12 月第 1 版

印 次: 2015 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5551-0540-4

定 价: 27.00 元

版权所有 侵权必究

质量服务承诺: 如发现缺页、错页、倒装等印装质量问题, 可直接与本社调换。

服务电话: 0771-5842790。

前 言

虽然有着几十年的实践与观察积累,但我仍总感到有些经验或教训还没有总结成文字被记录下来。尽管我已在国内几十个城市作过 220 多场学术报告,演示文稿(PPT)也应听众要求拷贝给过很多人,但那基本上只是个详细的讲话提纲;也出版了三本拙著,但仍有读者反映其中一些观点找不到书面的依据;国家电网公司还发行过一份内部录音教材,里面录有作者对一些观点的阐述,但是也不全面。多留点纸上的东西给青年一代的电容器研究人员,供他们今后工作时参考,以启发他们的思维,帮助他们在遇到这方面问题时少走弯路,就是我年近八旬,仍然想写点东西的唯一出发点。

本书拟就高压并联电容器与电容式电压互感器两大类产品的基础理论及应用等方面经常遇到的一些问题、今后应该如何处理或改进,以及向什么方向发展,毫无保留地与年轻人交流认识,以利于推动我国电力电容器的技术进步。

书中涉及的一些观点,可能已经在人们心中根深蒂固,甚至早已在电容器行业形成了“共识”,或者占有“主导”地位,可是作者却一直怀疑某些观点的适用性或正确性。同时也清楚地知道,千百万人的习惯认识是极难改变的,所以很愿意把一己之见摊开来,以方便有兴趣的人们去仔细玩味,哪怕是被当作“奇文共欣赏,疑义相与析”,也没有什么关系,只要能开启年轻人的新思路,激发新亮点,抛砖引玉,没有什么不好。从这个意义上讲,仅以本书当作立志与电力电容器为伍的青年科技人员前进路上一块小小的铺路石吧!

有不少读者直接或间接反映,我在前面的书里,在解释问题时,点到为止的居多,不便于年轻人理解。为此,本书力求解释到位,是否又有矫枉过正之嫌,过于啰唆,只得请读者相互照顾,彼此理解。

还有读者反映,有些基础知识,例如有的专用数学知识对一般读者而言显得较偏一些,可否补充说明,以免到处查找;某些特殊公式是如何推导出来的;如何将有些概念性的定义加以量化等。本书为此专门增加了一章基础知识,供初学者参阅。目的是提高他们阅读本书的兴趣,加深对某些问题的理解。有基础的读者,完全没有必要在

这一章上花时间。

现在,请青年读者与我一起来品味一句西方电影里广为传播,也是我长期以来经常在脑海中萦回的台词“不想当将军的士兵,不是好兵!”可否引申一下:不想超越前人学术成果的技术人员,不能算作好技术人员。我衷心希望所有青年技术人员,都已经是,或者即将成为这种意义上的好技术人员。

当下,全国人民几乎都在为实现中华民族的伟大复兴而做梦、圆梦,上面的一些设想与愿望,就算是作者的老来梦吧!不过,这个老来梦,主观上是想对年轻人有所裨益,能否梦想成真,只能留给后人评说。下面一首拙劣的词,就作为老来梦来由的旁证吧。

破阵子

五十四载奔波,七十八秋消磨,
行广袤华夏大地,尽力把经验传播,
朋友遍全国。
虽在颐养天年,余热还应闪烁,
悠闲自在健身心,同行相求莫推脱,
助人天地阔。

作者 乙未年秋于桂林

目 录

1

第二节 串联电抗器与谐波	76
第三节 氧化锌避雷器与过电压	81
第四节 熔断器	88
第五节 电容器的继电保护	93
第六节 电容器的运行维护	100
第四章 电容式电压互感器	106
第一节 用户需求与继电保护技术 进步的差异	107
第二节 特殊的母线型电容式电压 互感器	111
第三节 电容式电压互感器的发展 方向	113
附录	116
输电电压与送电距离	116
电动机的电容补偿	117
纯铜线的熔断电流	118
系统背景谐波的简易估算法	119
参考文献	120

第一章 基础知识

为了方便初学者深入理解本书的观点,特先来讲清楚几个基本概念,有了这个基础,再往下阅读时,就会感到容易得多。

第一节 试验数据处理

1. 概率论与数理统计

概率论与数理统计,是一门专门研究偶然事件内在规律的学科。例如,我们使用的电容器铝箔,它的厚度,在设计、工艺、材料等不变的情况下,总有公差出现,不可能每千克铝箔都一样厚。厚度这个量就是一个偶然事件。要将数以吨计的铝箔厚度,完全准确地搞清楚,既不可能,也不一定必要,只要能在足够可靠性前提下,说清它的大致范围就可以了。对于人的平均寿命更是如此,不是实地算出来的,而是统计处理得出的。这就是概率论与数理统计学要研究的内容。尽管是偶然事件,但是它后面存在着某种必然性,即规律

性。

如果刚才说的铝箔生产,其中的原材料或工艺,有一项发生了变化,那么生产出来的铝箔厚度就变了,就不属于原来的偶然事件了。也就是说,对生产中不同批次的铝箔厚度,要分开调查研究。

我们测量铝箔的厚度,事先并不知道它合格与否,这个量是个随机变量。要从多次测量得到的数据,即所谓随机样本中,得出全部铝箔厚度的规律性,也即从有限的随机样本,推断总体的情况,就要用数理统计学的规律。

事实证明,通过机械制造出来的产品,它们的测量值,一般都符合统计学的规律。例如,随机样本足够多,即所谓大样本时,它服从正态分布,小样本则服从学生分布。

2. 正态分布

所谓正态分布,其概率密度分布函数 $\varphi(x)$ 是:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中: σ ——标准偏差;

a ——测得值的平均数。

该分布函数的分布曲线见图 1-1。

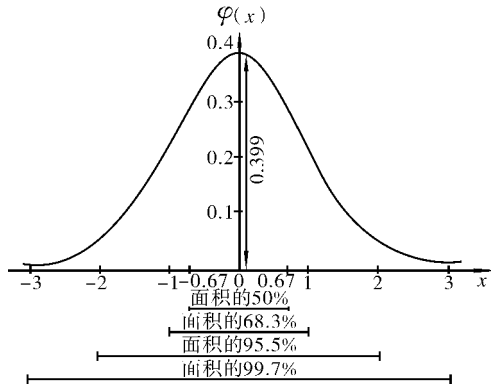


图 1-1 正态分布变量的分布曲线

一般以标准偏差的倍数,来决定对数据要求的高低程度,下面就来分析这方面的问题。

要求高时,一般按 $\pm 3\sigma$ (即正负 3 倍标准偏差) 来控制,这样的话,生产单位提供的厚度数据,可以保证有 99.7% 在受控范围内,这就是俗称的千分之三法则。而要求低一点的,则按 $\pm 2\sigma$ 来控制,那就仅有 95.5% 的厚度数据在受控范围内了。

假设每个测得值为 x_i ,那么标准偏差 σ 可以按下式计算:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - a)^2} \quad (2)$$

当 $n > 30$, 最好 $n \geq 50$ 时,采用 (2) 式计算。
当 $n < 30$ 时,则只能采用 t 分布规律了。

3. 学生分布

学生分布又称 t 分布,其概率密度分布函数如下:

$$s_{\nu}(t) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sqrt{\nu} \pi \Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right) \left(1 + \frac{t^2}{\nu}\right)^{\frac{\nu+1}{2}}} \quad (3)$$

式中: $-\infty < t < +\infty$; $\nu = n - 1$, 代表自由度, n 是样本容量。

它的概率密度分布函数,与正态分布略有区别,见图 1-2。对数据精确度要求低一点、样本容量小一点时,可以用它来处理数据。

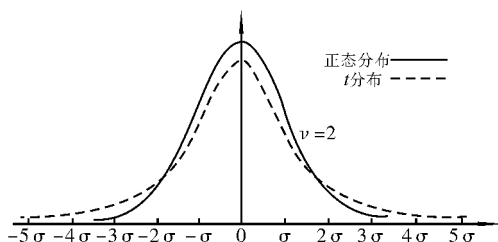


图 1-2 t 分布变量的分布曲线

第二节 几个重要公式的来历

1. 谐波放大

(1) 公式推导

图 1-3 是人们常用的电力系统变电站内并联电容器补偿装置的等值电路。在众多负荷中,对分析并联电容器补偿装置有重大影响的,主要是背景谐波情况,因此,其他无关内容一律略去。在此仅留下我们关心的负荷中的谐波电流 I_n 。

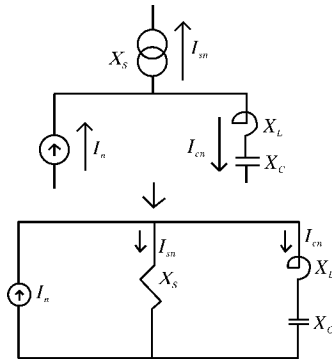


图 1-3 变电站并联电容器补偿装置等值电路

图中:

I_{cn} —— 流入电容器支路的谐波电流;

I_{sn} —— 进入电力系统的谐波电流;

I_n ——谐波源的电流;

X_L ——串联电抗器的电抗;

X_C ——电容器的容抗;

X_S ——系统的短路阻抗。

按照并联支路分流,便可以解出图 1-3 中两个支路中流过的电流值。

为了推导过程的方便,先设这两个支路各自的阻抗分别为 Z_1 与 Z_2 ,即

$$Z_1 = nX_S \quad (4)$$

$$Z_2 = nX_L + X_C/n \quad (5)$$

则有

$$I_{sn} = Z_2 I_n / (Z_1 + Z_2) \quad (6)$$

$$I_{cn} = Z_1 I_n / (Z_1 + Z_2) \quad (7)$$

然后,将(4)与(5)式分别代入(6)和(7)式,便有:

$$I_{cn} = nX_S I_n / (nX_S + nX_L + X_C/n) \quad (8)$$

(8)式右边分子、分母除以 nX_S 之后,则有:

$$I_{cn} = I_n / [1 + (nX_L + X_C/n) / nX_S] \quad (9)$$

令 $k = (nX_L + X_C/n) / nX_S \quad (10)$

再将(7)式作与此相同的变换,便不难得出:

$$I_{sn} = I_n / (1 + k) \quad (11)$$

$$I_{sn} = k I_n / (1 + k) \quad (12)$$

请注意, k 当初仅仅是为了简化(11)式与

(12) 式,使它的书写简洁、易于记忆而引进的一个中间变量,没有想到,它还有着极其重要的、多方面的物理意义。从下面的讨论中,我们就会慢慢发现这一层意思。

先来看所谓谐波放大。如果(11)式中, $k < 0$, 即(10)式中分子的感抗小于容抗,而二者的值又反号,于是 k 便变成为负数,即(11)式分母 $1 + k < 0$,那就一定会出现 $I_{cn} > I_n$ 的情况。也就是说,这时进入电容器的谐波电流,比系统背景谐波电流还要大一些,这就叫作谐波放大。

(2) 谐波放大与否的直观判断

真的需要对每一套并联电容器补偿装置进行上述具体计算,然后才能对它是否放大了相应次数的谐波电流做出答复吗? 不是。有个非常简单的方法,可以马上知晓答案。

刚才讲了, $k < 0$ 时必然放大相应的谐波电流。我们不妨令(10)式小于零,即

$$k = (nX_L + X_C/n) / nX_S < 0 \quad (13)$$

因为 X_S 是实数,它对分数的正负没有影响,以及感抗与容抗反号,实际上(13)式就表示分子 $nX_L - X_C/n < 0$,如果不等式两边除以 X_C ,则有

$$X_L/X_C < 1/n^2 \quad (14)$$

而(14)式左边就是串联电抗器的电抗率 β ,

所以(14)式又可以改写成:

$$\beta < 1/n^2 \quad (15)$$

根据(15)式,一眼就能看出电抗率小到什么程度,就会发生谐波放大现象。为了更加直观,特将此值列入表1-1。

表 1-1 β 放大谐波的下限值

谐波次数(n)	β 的下限值($1/n^2$)
3	$1/3^2 = 11.11\%$
5	$1/5^2 = 4.0\%$
7	$1/7^2 = 2.04\%$

2. 单一电抗率电容器组的并联谐振

(1) 公式推导

所谓并联电容器补偿装置与系统发生了并联谐振,从电工学的角度来说,也称之为电流谐振。因为这时图1-3中两个并联支路里的电流,其理论值就变为无穷大。

由此出发,(10)式与(11)式里,当 $k = -1$ 时, I_{cn} 与 I_{sn} 就会因为分母为零而变成无穷大,这便是发生并联谐振的条件。下面就来看一看这种情况下的公式推导。

令:

$$k = (nX_L + X_C/n) / nX_S = -1 \quad (16)$$

虑及感抗与容抗反号,故有

$$(nX_L - X_C/n) / nX_S = -1 \quad (17)$$

移项后

$$nX_L - X_C/n = -nX_S \quad (18)$$

(18) 式两边除以 nX_C , 加上 $\beta = X_L/X_C$, 则

$$\beta = 1/n^2 - X_S/X_C \quad (19)$$

而

$$X_S = 3U_S^2/S_d \quad (20)$$

这里 U_S 是电容器安装处、系统母线的相电压, S_d 是该处母线对地短路容量。而

$$X_C = 3U_C^2/Q_C \quad (21)$$

这里 U_C 是串联电抗器抬高后的电容器端电压, 它与 U_S 的关系如下:

$$U_C = U_S / (1 - \beta) \quad (22)$$

现在将(20)、(21)与(22)式代入(19)式, 则有

$$\begin{aligned} X_S/X_C &= (3U_S^2/S_d) / [3U_S^2 / (1 - \beta)^2 Q_C] \\ &= (1 - \beta)^2 Q_C / S_d \end{aligned} \quad (23)$$

而 β 按国家标准规定为 $0.045 \sim 0.12$, 那么

$$(1 - \beta)^2 \in (0.7744, 0.912) \quad (24)$$

如果将它略去不计, 即假设

$$(1 - \beta)^2 \simeq 1 \quad (25)$$

则有

$$X_s/X_c \approx Q_c/S_d \quad (26)$$

所以(19)式就可以简化为

$$\beta = 1/n^2 - Q_c/S_d \quad (27)$$

将(27)式稍加整理,便有

$$Q_c = S_d(1/n^2 - \beta) \quad (28)$$

这就是《并联电容器装置设计规范》(GB 50227-2008)的谐振计算公式。

(2)(28)式的准确性

由于从(19)式简化为(26)式时, Q_c/S_d 的值被放大了,而可能发生谐振的谐波次数 n ,被当作未知数求解时,由(28)式可知有:

$$n^2 = 1/(Q_c/S_d + \beta) \quad (29)$$

从(29)式不难看出,分母中的一项 Q_c/S_d 被放大后,整个分数的值就减小了,所以实际上得到的 n 值偏小了。

作者多次说过,对于这个已知偏小的数值,不能四舍五入,只能采用收尾法,即进位处理^[1-3]。一般计算到小数点后两位,再往前进位,到保留一位小数为止。

这样收尾后,与不作近似处理的复杂公式[即(19)式与(23)式合起来的计算结果]有何差别?二者的比率多大?下面我们将就此举例说明。

假设某企业自备变电站有一套并联电容器补