

Dianli Xitong Wugong Youhua

电力系统无功优化 与电压调整

29662
yu Dianya Tiaozheng

陈文彬 著

C77



辽宁科学技术出版社
LIAONING SCIENCE AND TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

DIANLIXITONGWUGONGYOUHUAYUDIANANYATIAOZHENG

电力系统 无功优化 与电压调整

陈文彬 著

辽宁科学技术出版社

· 沈阳 ·

© 2003 版权归陈文彬所有,授权辽宁科学技术出版社使用

图书在版编目(CIP)数据

电力系统无功优化与电压调整 / 陈文彬著 . — 沈阳 :
辽宁科学技术出版社, 2003. 3
ISBN 7-5381-2299-0

I. 电… II. 陈… III. ①电力系统-无功功率-
最佳化 ②电力系统-系统电压调整 IV. TM714

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 048524 号

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路 25 号 邮编: 110003)

印刷者: 沈阳市北陵印刷厂

幅面尺寸: 140mm×203mm

字 数: 140 千字

印 张: 6.25

插 页: 3

印 数: 1-3000

出版时间: 2003 年 3 月第 1 版

印刷时间: 2003 年 3 月第 1 次印刷

责任编辑: 李伟民

封面设计: 李若虹

版式设计: 于 浪

责任校对: 刘 庶

定 价: 28.00 元

联系电话: 024-23284360

邮购咨询电话: 024-23284502

E-mail: lkzsb@mail.lnpgc.com.cn

http://www.lnkj.com.cn

序

跨入二十一世纪,电力系统领域的科技进步显著加快,大批科研成果相继问世并陆续付诸实用,科技著述如雨后春笋般涌现于学界,这标志着中国电力事业正处于蓬勃发展的时期。

纵观近年来发表的电力系统方面的大量论文和专著,其中应用新理论、新方法研究前人或别人没有或很少涉猎的新课题者众,锲而不舍、深入探究相对传统的理论问题和基础应用问题者则如龙鳞凤爪。陈文彬先生的这部专著则系研究传统的基础性课题的力作。众所周知,研究那些相对比较成熟的课题,常常会使人耗尽心力而难有所成。然而该书作者却知难而进,潜心研究随电力系统与生俱来的无功功率优化与电压调整问题并有突出建树,他所付出的艰辛是可想而知的,这也足见作者专业功底之深厚。

无功优化与电压调整是关系到电力系统运行经济性和电能质量的全局性重大课题,又是必须同时计及各个电压等级中的各种设备参数和运行参数的相对复杂的课题。该书作者在已有研究成果的基础上,深入钻研,特别在地区电网和配电网的无功优化和电压调整问题的研究上独辟蹊径、勇于创新,提出了“等长度判据”、“等面积判据”及“切线法”等新的理论与方法。其精妙之处还在于把复杂的高等数学运算改用初等几何的作图法加以解决,同时赋予了更加直观的物理含义。此外,书中还摒弃了以往方法中的某些人为的假设条件,因而使最终结果更为准确,

节能降损和调压效果亦更佳。

该书所提出的理论与方法深入浅出,化繁为简,不仅从事电力系统科研、教学、设计和运行的专业人员易于掌握和运用,即便专业基础并非很高的一般实际工作者也可绕开书中较艰深的理论推导而径直采用该书所提出的方法来解决实际问题。就其理论价值而言,该书可作为大专院校电力专业师生和电力系统科研人员的参考书;就其实践价值而言,又可作为电网生产、运行人员的工具书。

陈文彬先生长期从事电力企业的管理和领导工作,他却能在科学研究上不辍耕耘,艰辛跋涉,并取得如此优异之成果,实在可钦可贺。

中国工程院院士 韩英铎
清华大学教授
2003年3月2日

前 言

在电力系统运行过程中,提高电能质量,降低生产成本,减少电能损失的手段是多种多样的,但是归纳起,无外乎两大类:一是通过改进电力系统中的发输用电设备来优化其设备参数;二是通过调整电力系统的运行方式来优化其运行参数。而依靠优化电力系统运行参数来达到上述目的方法又大体上分为两种:即有功功率优化和无功功率优化。

近年来,从事电力系统研究和生产运行实践工作的人们,在不断地对有功功率优化问题进行深入研究探索并在实践中日益取得硕果的同时,开始把目光更多地投向无功功率优化这一过去人们较少涉足的领域。

电力系统无功功率优化与电压调整问题是一个较复杂的问题,比之有功功率优化有更大的难度。众所周知,有功功率优化与频率调整只需而且也只能在电源端实施,这种优化与调整工作又只能由电力调度部门统一安排和操纵。但是,电力系统的无功功率优化与电压调整却应当在不同电压等级系统内的不同部位乃至用户端,本着“分级就地”的原则,同时分别进行,这就不是电力调度部门所能独立完成的了。

一个时期以来,对于电力系统无功功率优化与电压调整的研究十分活跃。现代优化理论和计算技术日益广泛的应用,促使不少有价值的研究成果相继出现,并不同程度地得以应用。但其中对地区电网和配电系统无功功率优化和电压调整的研究

成果尚鲜有所见。在实际运行中,一般还处于依据比较粗略的计算方法或仅仅凭借经验从事的状态,这在很大程度上制约了降损节电效果和电压质量的改善。深入探索电力系统无功功率优化和电压调整的理论和方法,尽快普及应用最新研究成果,是电力经营企业在提高电网运行质量和其经济性的努力中所面临的艰巨任务之一。

本书作者在综合分析介绍当前本领域主要研究成果的同时,着力深入研究了地区电网和配电网无功功率优化和电压调整问题,并提出了全新的无功补偿理论和方法。其中包括“等面积判据”、“等长度判据”和并联电容器改善配电线路电路质量的配置方法——切线法等等。这些独到的理论和方法更好地解决了如何同时确定无功补偿设备最佳容量、最佳安装部位和最佳投切时间,从而取得最大降损效果和合格电压质量的问题,这正是本书的精髓所在。

作为电力系统科研人员、生产运行技术人员及电力系统专业大专生和研究生的学习、参考文献,本书系统地论述了电力系统主网、地区电网和配电网亦即整个电力系统的无功功率优化与电压调整的理论与方法,力求作到新、简、精,立足于实用性。为有助于读者理解其中理论推导过程和掌握实际解题步骤,书中列举了一些算例以供借鉴。

本书的一些重要内容是作者读研究生期间的研究成果,曾蒙恩师戴克健教授殷殷指导和认真阅审,在此谨致谢忱。

由于作者水平所限,书中难免有缺欠甚至错谬之处,恭请各位读者不吝指正,作者将不胜感谢之至。

作 者

2002年8月于沈阳

目 录

序

前 言

第一篇 配电系统的无功功率优化

第一章 末端集中负荷线路的最佳分级补偿·····	1
§ 1-1 问题的提出 ·····	1
§ 1-2 理论分析与求解方法 ·····	2
§ 1-3 在有二个以上大型负荷的线路上最佳分级补偿 ·····	13
§ 1-4 实例计算及其分析 ·····	15
第二章 分布负荷线路最佳分散无功补偿 ·····	18
§ 2-1 对该问题的研究状况 ·····	18
§ 2-2 理论分析 ·····	20
§ 2-3 求解方法与程序 ·····	30
§ 2-4 参数变化对最佳无功补偿的影响 ·····	36
§ 2-5 两种特殊情况下的最佳无功补偿 ·····	40
第三章 分布负荷线路中的固定与投切混合最佳 无功补偿 ·····	44
§ 3-1 问题的提出 ·····	44
§ 3-2 最佳混合补偿的理论推导 ·····	46
§ 3-3 求解步骤与计算机程序 ·····	56

§ 3-4 算例	57
第四章 考虑电压约束时无功补偿容量的调整	60
§ 4-1 电压约束的存在	60
§ 4-2 电容器容量的调整方式	61
第五章 对实际线路的最佳补偿计算及结论	70
§ 5-1 对实际线路的最佳补偿计算	70
§ 5-2 结论	71

第二篇 地区电网与主网的无功功率优化

第六章 地区电网无功补偿设备的优化配置	74
§ 6-1 求解途径分析	74
§ 6-2 算例和结论	79
第七章 电力系统主网的无功功率优化问题	83
§ 7-1 逐步逼近法	84
§ 7-2 基于分布系数的电力系统的最佳无功功率补偿	93

第三篇 电力系统的电压调整

第八章 电压管理	109
§ 8-1 保证系统电压质量的重要性	109
§ 8-2 电压管理	113
第九章 电力系统的调压措施	120
§ 9-1 发电机调压	120
§ 9-2 借调整变压器变比调压	123
§ 9-3 带负荷调压变压器的应用	128
§ 9-4 采用并联无功补偿设备调压	132
§ 9-5 串联电容器调压	139
第十章 各种调压措施的综合运用——组合调压	141

§ 10-1 敏感度矩阵方程	141
§ 10-2 敏感度系数矩阵的建立	147
§ 10-3 算例	153
第十一章 线性网络模型下的调压方法——最小电压 图形解法	157
第十二章 用以改善配电线路电压质量的电容器配置 方法——切线法	166
§ 12-1 无功补偿后的配电线路上电压分布的数学描述	166
§ 12-2 求解方法与步骤	170
附 录	178

第一篇

配电系统的无功功率优化

我国的配电系统,普遍存在着负荷分散而波动较大,供电半径长,功率因数低,无功功率不足等问题,因而线路电能损失和电压损失相当严重。据统计资料表明,配电网中的电能损耗约占地区线损的 $2/3$ 左右。显然,采取有效措施尽可能地减少配电网中的电能损耗,应当是电力部门降低成本,提高效益的主攻方向之一。对配电系统进行无功功率补偿就是降损的有效手段。

配电系统的无功功率补偿设备主要是并联电容器组。本篇所讨论的无功功率优化问题,实质上就是确定并联电容器组的配置和控制方式,其中包括确定并联电容器组的组数(即补偿点个数),各组电容器的容量和安装位置,以及它们的投切时刻,以使补偿后的配电网获得最大的降低线损效果。

第一章 末端集中负荷线路的最佳分级补偿

§ 1-1 问题的提出

有些配电线路,只是在其末端有一较大的集中负荷,由变电所向工矿企事业单位专线供电即属此类。显然,对这种线路的无功补偿要在负荷处(用户)进行。这些用户的特点是,负荷在每

一个运行周期(一般是天)内的变化规律基本相同,补偿设备的安装管理条件较好。

目前国内对这类线路的无功补偿,一般不是以更多地减少线损为目的,而是根据将负荷的平均功率因数提高到 0.85 或 0.9,通过公式

$$Q = p \left[\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \phi_1 - 1}} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \phi_2 - 1}} \right] \quad (\text{见文献 3})$$

来计算补偿电容器的固定容量,进行无调节的固定补偿。这种补偿方式,线路的降损效果没有达到最佳,而且随着无功负荷的变化,还可能出现无功补偿不足或者过补偿的问题。近年来,研制了以负荷功率因数作控制量的分级自动投切电容器补偿装置。不过,应用这种补偿装置,还不能更充分减少线损,获得最大的经济效益。而且由于功率因数的变化并不能完全代表无功负荷的变化,有时这种装置会出现频繁投切,不得不退出运行的问题。

本章中提出一种随着负荷的无功电流变化调整电容器容量的最佳分级补偿方式,并建立了相应的求解方法和计算程序。这种补偿方式是以最大限度地降低线损为目的的。

§ 1-2 理论分析与求解方法

本章所叙述的最佳分级无功补偿所要解决的问题是,确定出各级最佳电容器容量和最佳投切时刻。

图 1-1 是末端集中三相负荷线路的示意图。线路电阻是 R (欧),负荷的峰值有功电流是

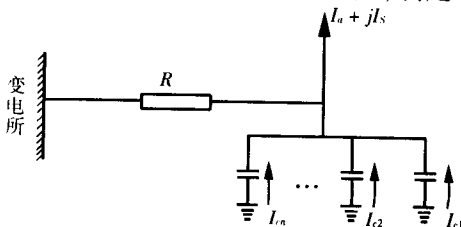


图 1-1

I_a (安), 负荷的峰值无功电流是 I_s (安), 无功电流变化曲线 $I_s\varphi(t)$ 和无功电流持续曲线 $I_s\phi(T)$ 分别如图 1-2 和图 1-3 所示。

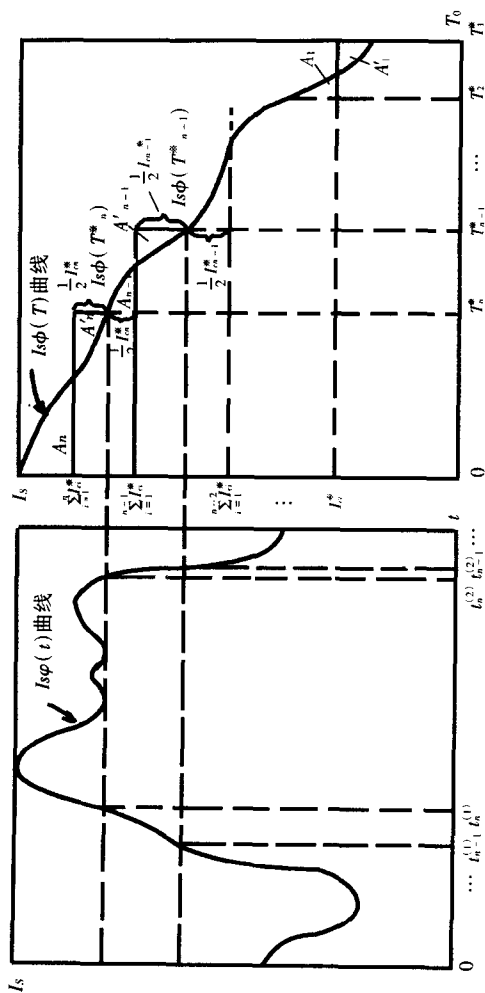


图 1-3

图 1-2

在电容器未投入运行之前,峰值电流在线路上造成的功率损耗是:

$$P_M = 3(I_a^2 + I_s^2)R \quad (1-1)$$

假设电容器组共分 n 级,每级的电容电流值分别是 I_{c1} 、 $I_{c2} \cdots I_{cn}$ 。其投入运行的时间长分别是 T_1 、 T_2 、 $\cdots$ 、 T_n (小时)。电容器组投入运行后,峰荷时线路上的功率损耗是:

$$P_{MC} = 3[I_a^2 + (I_s - \sum_{i=1}^n I_{ci})^2]R \quad (1-2)$$

可见,由于电容器组的补偿作用使线路峰荷功率损耗较补偿前减少值是:

$$\Delta P_M = P_M - P_{MC} = 6I_s R \cdot \sum_{i=1}^n I_{ci} - 3R \cdot (\sum_{i=1}^n I_{ci})^2 \quad (1-3)$$

则一个负荷周期(天) T_0 内线路上电能损耗的减少值是:

$$\begin{aligned} \Delta E &= \int_0^{T_0} \Delta p(T) dT = \int_0^{T_1} \Delta p(T) dT + \int_{T_1}^{T_2} \Delta p(T) dT + \cdots + \\ &\int_{T_{n-1}}^{T_0} \Delta p(T) dT = \int_0^{T_1} [6I_s \phi(T) R \cdot \sum_{i=1}^n I_{ci} - 3R \cdot (\sum_{i=1}^n I_{ci})^2] dT + \\ &\int_{T_1}^{T_2} [6I_s \phi(T) R \sum_{i=1}^{n-1} I_{ci} - 3R \sum_{i=1}^{n-1} I_{ci}^2] dT + \cdots + \int_{T_{n-1}}^{T_0} [6I_s \phi(T) R \cdot (I_{c1} \\ &+ I_{c2}) - 3R \cdot (I_{c1} + I_{c2})^2] dT + \int_{T_2}^{T_1} [6I_s \phi(T) R I_{c1} - 3R I_{c1}^2] dT = \\ &6R \cdot [I_{c1} \int_0^{T_1} I_s \phi(T) dT + I_{c2} \int_0^{T_2} I_s \phi(T) dt + \cdots + I_{cn} \int_0^{T_n} I_s \phi(T) dT] \\ &- 3R \cdot [T_n (I_{cn}^2 + 2I_{cn} \cdot I_{cn-1} + \cdots + 2I_{cn} I_{c1}) + T_{n-1} \cdot (I_{cn-1}^2 + \\ &2I_{cn-1} I_{cn-2} + \cdots + 2I_{cn-1} \cdot T_{c1}) + \cdots + T_2 (I_{c2}^2 + 2I_{c2} \cdot I_{c1}) + \end{aligned}$$

$$T_1 I_{c1}^2] = 6R \cdot \sum_{i=1}^n [I_{ci} \int_0^{T_i} I_s \phi(T) dT - 3R \{ \sum_{i=1}^n T_i I_{ci}^2 + 2 \cdot \sum_{i=2}^n (T_i \cdot I_{ci} \cdot \sum_{j=1}^{i-1} I_{cj}) \}] \quad (1-4)$$

考虑到电容器本身的功率损耗很小(约为其容量的0.3%)[20]可予以忽略。于是,在一个负荷周期 T_0 内,从线路减少功率与电能损耗中得到的经济效益,扣除电容器费用,便得到无功补偿后的经济效益:

$$S = Ke \cdot \Delta E \cdot 10^{-3} + K_P \cdot \Delta P_M \cdot 10^{-3} - K_C \cdot (\sqrt{3} U_l \sum_{i=1}^n I_{ci}) (\text{元}) \quad (1-5)$$

其中: K_p 是每千瓦发输电设备日平均费用,元 /kW · 日;

Ke 是单位电能价格,元 /kW · h;

Kc 是单位容量电容器日平均投资,元 /kVR · 日;

U_l 是配电线路电压,kV。

为求取使 S 取得最大值的各级电容电流和投入时间长,令:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial I_{ci}} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial T_i} = 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad \text{方程组(1-I)}$$

对上面方程组进行偏微分运算后,得到如下方程组:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \int_0^{T_n^*} I_s \phi(T) dT - T_n^* \cdot \sum_{i=1}^n I_{ci}^* = \frac{\sqrt{3} K_c U_l \cdot 10^3}{6R \cdot K_e} - \frac{K_p}{K_e} (I_S - \sum_{i=1}^n I_{ci}^*) \\
 \int_0^{T_{n-1}^*} I_s \phi(T) dT - (T_n^* I_{cn}^* + T_{n-1}^* \cdot \sum_{i=1}^{n-1} I_{ci}^*) = \frac{\sqrt{3} K_c U_l \cdot 10^3}{6R \cdot K_e} - \frac{K_p}{K_e} \\
 (I_S - \sum_{i=1}^n I_{ci}^*) \\
 \vdots \\
 \int_0^{T_2^*} I_s \phi(T) dT - (\sum_{i=2}^n T_i^* I_{ci}^* + T_2^* I_{c1}^*) = \frac{\sqrt{3} K_c \cdot U_l \cdot 10^3}{6R \cdot K_e} - \frac{K_p}{K_e} \cdot \\
 (I_S - \sum_{i=1}^n I_{ci}^*) \\
 \int_0^{T_1^*} I_s \phi(T) dT - \sum_{i=1}^n T_i^* I_{ci}^* = \frac{\sqrt{3} K_c \cdot U_l \cdot 10^3}{6R K_e} - \frac{K_p}{K_e} (I_S - \sum_{i=1}^n I_{ci}^*) \\
 I_s \phi(T_n^*) = \sum_{i=1}^{n-1} I_{ci}^* + \frac{I_{cn}^*}{2} \\
 I_s \phi(T_{n-1}^*) = \sum_{i=1}^{n-2} I_{ci}^* + \frac{I_{cn-1}^*}{2} \\
 \vdots \\
 I_s \phi(T_2^*) = I_{c1}^* + \frac{I_{c2}^*}{2} \\
 I_s \phi(T_1^*) = \frac{I_{c1}^*}{2}
 \end{array} \right. \quad \text{方程组(1- II)}$$

此方程组是由 $2n$ 个方程式组成的积分方程组, 直接对其求解是很难的。我们将该方程组中的第 $2 \sim n$ 个方程式分别与前一个方程式相减, 并对第 $n+1 \sim 2n$ 个方程式加以整理, 则方程组(1- II) 演变成如下形式:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \int_0^{T_n^*} I_s \phi(T) dT - T_n^* \cdot \sum_{i=1}^n I_{ci}^* = \frac{\sqrt{3} K_c U_l \cdot 10^3}{6R \cdot K_e} - \frac{K_p}{K_e} (I_s - \sum_{i=1}^n I_{ci}^*) \\
 \int_{T_n^*}^{T_{n-1}^*} I_s \phi(T) dT - (T_{n-1}^* - T_n^*) \sum_{i=1}^{n-1} I_{ci}^* = 0 \\
 \vdots \\
 \int_{T_2^*}^{T_3^*} I_s \phi(T) dT - (T_2^* - T_3^*) \cdot (I_{c1}^* + I_{c2}^*) = 0 \quad \text{方程组(1 - III)} \\
 \int_{T_2^*}^{T_1^*} I_s \phi(T) dT - (T_1^* - T_2^*) \cdot I_{c1}^* = 0 \\
 I_{cn}^* = 2 \cdot \left\{ \sum_{i=1}^n I_{ci}^* - I_s \phi(T_n^*) \right\} \\
 I_{cn-1}^* = 2 \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} I_{ci}^* - I_s \phi(T_{n-1}^*) \right\} \\
 \vdots \\
 I_{c2}^* = 2 \cdot \{ I_{c1}^* + I_{c2}^* - I_s \phi(T_2^*) \} \\
 I_{c1}^* = 2 \cdot I_s \phi(T_1^*)
 \end{array} \right.$$

经过改造后而得到的方程组(1 - III), 虽然还是一个非线性积分方程组, 仍然很难直接求解, 但是我们对它进行仔细分析, 可以发现这个新方程组具有如下两个重要特性:

(1) 方程组中第 1 ~ n 个方程式所表示的几何意义是, 在图 1 - 3 中, 面积 $A_n - A'_n = \frac{\sqrt{3} K_c U_l \cdot 10^3}{6R \cdot K_e} - \frac{K_p}{K_e} (I_s - \sum_{i=1}^n I_{ci}^*)$, 而面积 $A_{n-1} = A'_{n-1} \cdots A_1 = A'_1$ 。我们称此特性为“等面积判据”。

(2) 方程组中第 $n + 1 \sim 2n$ 个方程的几何意义在于, 无功负荷持续曲线 $I_s \phi(T)$ 上的点 $I_s \phi(T_i^*)$ 将表示 I_{ci}^* 的线段平分成相等的两部分 ($i = 1, 2, \dots, n$), 我们称此特性为“等长度判据”。