

变压器最佳容量 确定和经济运行

丁毓山 高松 主编

中国水利水电出版社

内 容 提 要

变压器经济运行是电力网降耗节能的重要技术手段。本书主要讲述了有关变压器最佳容量确定及经济运行的有关知识。全书内容包括：变压器最佳容量的确定；配电变压器经济运行；变压器并列经济运行分析及分列经济运行分析；变压器躲峰调载下的经济运行；变压器动态损失计算、群体经济运行及经济运行的程序设计等。同时，书中还给出了大量计算实例，以便于在分析工程实际问题中参考。

本书适于广大从事变压器经济运行的工程技术人员阅读，亦可作为大、中专院校电力专业学生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

变压器最佳容量确定和经济运行/丁毓山，高松主编．北京：中国水利水电出版社，1996

ISBN 7-80124-149-5

I. 变… II. ①丁…②高… III. ①变压器-电容-最佳化-设计
②变压器-运行 IV. TM406

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 05115 号

书 名	变压器最佳容量确定和经济运行		
作 者	丁毓山 高松 主编		
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044)		
经 售	全国各地新华书店		
排 版	密云红光照排厂		
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂		
规 格	787×1092 毫米 32 开本 9.125 印张 202 千字		
版 次	1996 年 11 月第一版 1996 年 11 月北京第一次印刷		
印 数	0001—1300 册		
定 价	18.00 元		

编者名单

主 编 丁毓山 高松

副主编 关守俊 胡乃有 周文桥

编写人员 毛宏伟 唐宝清 王泽丰

董 杰 李 峻 丁先洲

于向东 周贵锁 刘鹏宇

李德宇

前 言

变压器经济运行是电力网降损节能的重要手段。随着电力网容量的不断扩大,管理水平的不断提高,这一技术手段越来越受到人们的重视。为了促进变压器经济运行技术的发展,将近年来有关变压器经济运行的有关论述整理出来形成书。全书共分八章:第一章为变压器最佳容量的确定;第二章为配电变压器经济运行;第三章为变压器并列经济运行分析;第四章为变压器分列经济运行分析;第五章为躲峰调载下经济运行;第六章为变压器动态损失计算;第七章变压器群体经济运行;第八章为经济运行的程序设计。

书中采用矩阵方法,对变压器各种运行方式下的经济状态、临界容量、运行曲线进行了详细的分析,给出了各种方式下进行计算的数学模式。本书所给的数学模式,特别考虑了各台变压器在运行中的负荷分配问题,克服了以往数学模式不计负荷不均匀分配的缺点。与此同时,书中还给出了大量的计算实例,以便于在分析工程实际问题中参考。为了有助于计算机管理,书中用 BASIC 和 dBASE III 给出了各种运行方式的计算机程序设计。

本书适用于广大从事变压器经济运行的工程技术人员,亦可作为大、中专院校电力专业学生的参考书。

编 者

1995 年 6 月 10 日

目 录

前 言

第一章 变压器最佳容量确定	1
第一节 变压器的发展与展望	1
第二节 变压器技术参数	7
第三节 按功率损耗最小和电能损耗最小确定变压器容量	15
第四节 综合各种因素影响条件下变压器最佳容量的确定	24
第二章 配电变压器经济运行分析	38
第一节 配电变压器经济运行区的划分	38
第二节 母子变经济运行方式分析	44
第三节 容量成等比数列的变压器经济运行分析	49
第四节 配电变压器高耗区的界线分析	54
第五节 配电变压器经济运行程序设计	59
第三章 变压器并列经济运行分析	67
第一节 双绕组等容量变压器并列经济运行分析	67
第二节 双绕组不等容量变压器并列经济运行分析	79
第三节 三绕组变压器并列经济运行分析	84
第四节 并列经济运行程序设计	96
第五节 相同台数间的经济运行分析	106
第六节 不同台数间的经济运行分析	115
第四章 变压器分列运行分析	128
第一节 等容量变压器的分列运行	128
第二节 变压器不等容量分列经济运行分析	138
第三节 按全年电能损耗最小为原则来考虑分列 和共用运行方式的临界容量	144

第四节	三绕组变压器分列运行.....	146
第五节	并列和分列运行混合分析.....	149
第六节	变压器分列运行的程序设计.....	153
第五章	变压器躲峰调载下的经济运行.....	164
第一节	调整负载曲线和负载波动系数.....	164
第二节	躲峰和填谷经济运行分析.....	170
第三节	躲峰填谷的程序设计.....	176
第四节	变压器运行方式的经济负荷率.....	184
第五节	变压器经济运行方式和经济运行区.....	193
第六章	变压器经济运行的动态计算.....	200
第一节	负载波动损失系数的理论分析.....	201
第二节	变压器动态损失计算.....	211
第七章	变压器群体经济运行.....	222
第一节	优化配电网电压的平行四边形理论.....	222
第二节	在配电网中变压器的降损途径.....	247
第三节	随机理论在变压器容量优选中的应用.....	254
第八章	变压器经济运行程序设计.....	270
第一节	并列经济运行的程序设计.....	270
第二节	配变经济运行程序设计.....	280
参考文献		286

第一章 变压器最佳容量确定

第一节 变压器的发展与展望

自 19 世纪变压器问世以来,至今已有 100 年的历史。在百十余年的历史进程中,作为电力系统重要设备之一的电力变压器,与电力系统发展的同时,也获得了飞速的发展。1885 年,世界上第一台变压器诞生于欧洲,那时只应用在单相供电系统中,1890 年才制成了三相电力变压器。可是现在已能生产容量为上千兆伏安的巨型变压器。仅就我国而论,随着 500kV 大型变电站的建立,将要生产容量为 240、360MVA 的变压器。三峡水电站将要采用 70 万 kW 机组,与之配合的变压器容量将为 900MVA。我国目前生产变压器的大、小厂家约为 500 多个,而且生产变压器的型号、结构、参数、性能在不断更新。诸如节能型的低损耗变压器、SF₆ 变压器、超导变压器,其产品性能不断向体积小、重量轻、低噪音、高效率、强过载、抗冲击的方向前进。

变压器在电力系统的使用数量是相当大的,一般从发电、输电、配电、用电的程序来看,电能从发电厂输出到用户使用共需 3~5 次变压。根据国内外的统计数字,运行变压器的容量通常为发电容量的 4~7 倍,是运行电机容量的 5~8 倍,这就决定了变压器必须是一个高效率的设备。尽管如此,但因其数量多、容量大,损耗仍然是相当可观的。1980 年,全国电网损耗约占发电功率 5.11%,其中变压器损耗占全部损耗的 27%,因此,降低损耗,合理的确定变压器容量,加强

经济运行管理，具有十分重要的意义。

下面对我国电力变压器的生产技术的发展情况给以简要的叙述。

一、SL₇ 与 S₇ 系列电力变压器

自 60 年代以来，我国早期生产的电力变压器皆为依照国家 GB500—64 和 JB1300—73 标准制造的高能耗变压器，主要有 SJ、SJ_{1~5}、SJL、SJL₁、S、S₁、SL、SZ、SLZ、SLZ₁ 等系列。由于节能工作的要求，1983 年原水利电力部以 (83) 水电物字第 16 号文下达了“关于停止装用高能耗变压器的通知”，又于 1985 年以水电物字第 24 号文再次下达了“关于高能耗变压器更换问题的通知”。文中明确规定凡按 GB500—64 和 JB1300—73 标准制造的变压器，必须限期逐步更换为按新标准制造的 S₇、S₈、SL₇、SZL₇ 系列的节能型变压器。

80 年代以来，全国统一设计的 SL₇、SZL₇ 系列变压器，在各变压器制造厂的产品中占绝对的优势，其原因是由于这些系列的变压器的损耗比按 JB1300—73 标准生产的变压器损耗平均可下降 1/3 左右，且运行稳定、噪音小、质量可靠。SL₇ 及随后出现的 S₇ 系列变压器符合国家 GB1094—85 标准，其性能数据与现行国家标准 GB6541—86《三相油浸电力变压器技术数据与要求》相吻合，与国际上 IEC 标准相等效。国产电力变压器与国外同类产品性能参数比较如表 1-1 所示。

S₇ 型变压器系采用铜芯线变压器，并非统一设计，除性能参数和结构形式与 SL₇ 相同外，铁芯直径、绕组线规、外型尺寸与 SL₇ 都不尽相同，可以认为 S₇ 实际上是 SL₇ 一种变形设计。S₇ 与 SL₇ 的性能和损耗与德国西门子公司 1974 年的同类产品水平相当。这两种变压器在节约能源，降低网络损耗方面发挥了巨大的作用。

表 1-1 国产变压器与国外变压器性能比较表

额定容量 (kVA)	空 载 损 耗 (W)				负 载 损 耗 (W)								
	中 国		意大利	德 国	比利时		中 国	意大利	德 国	比利时			
	SL ₇	S ₉			HR12	H12				SL ₇	S ₉	HR12	H12
30	150	130	—	—	800	600	—	—	—	—	—		
50	190	170	175	185	1150	870	190	870	1100	850	950		
63	220	200	200	—	1400	1040	—	1000	—	—	—		
80	270	250	250	210	1650	1250	—	1245	—	1230	1330		
100	320	290	296	230	2000	1500	320	1450	1750	1490	1560		
125	370	350	352	275	2450	1750	—	1720	—	1730	1780		
160	460	420	462	325	2850	2100	460	2080	2350	2070	2210		
200	540	500	525	390	3400	2500	—	2470	—	2500	2600		
250	640	590	600	475	4000	2950	650	2920	3250	2820	2930		
315	760	700	720	575	4800	3500	—	3470	—	3310	3450		
400	920	840	865	725	5800	4200	930	4160	4600	4030	4200		
500	1080	1000	1030	950	6900	5000	—	4920	—	4700	4920		
630	1300	1230	1250	1200	8100	6000	1300	5800	6500	5520	5700		
800	1540	1450	1500	1360	9900	7200	—	7200	—	6860	7200		
1000	1800	1720	1750	1520	11600	10000	1700	10000	10500	8260	8650		
1250	2200	2000	2050	1800	13800	11800	—	11500	—	—	—		
1600	2650	2450	2500	2200	16500	14000	2600	14000	17000	—	—		

注 德国按其国家标准 DIN42500 将损耗参数分为标准系列、第二系列及降低系列三类。表中所列为准系列数据。为便于对比,将我国第二代节能变压器 S₉ 系列的相关数据也一并列入表内。

二、S₉系列电力变压器

S₉系列电力变压器与SL₇、S₇一样，属于低损耗、节能型产品，而且其损耗更低，平均可比SL₇、S₇型系列变压器降低：空载损耗7%，负载损耗21%，总损耗20%。已达到80年代初期意大利同类产品的水平。

S₉系列变压器采用铜芯导线，选用晶粒取向冷轧硅钢片作为铁芯材料，取全斜接缝方式拼装，钢片厚度由0.35改为0.3，以适应国外发展趋向，同时进一步降低损耗。但这种变压器的用铜量和成本与SL₇系列相比皆有所增加，如表1-2所示。

三、干式变压器

干式变压器不使用绝缘冷却液，具有防水、防潮、耐高温、难燃烧、无爆炸、无火灾等优点。对飞机场、地下铁道、高层建筑等安全要求较高的场所尤为适用。它通常包含空气自冷及树脂绝缘两大类，而树脂绝缘型又包含环氧树脂绝缘浇注和玻璃纤维增强绝缘两种。由于采用环氧树脂绝缘，其介电强度通常为空气的十倍，故变压器总体尺寸大为缩小，具有体积小、重量轻、效率高、耐电压冲击等优点。因此，在发达国家中，干式变压器的生产和应用比较广泛。如美国的变压器总容量中，干式变压器容量高达60%以上。国外干式变压器的生产已具有相当水平，产品电压达35kV级，最大容量达10000kVA。

关于干式变压器的生产，与国外相比，我国尚有不小的差距。现仅能生产电压为10kV、容量为1000kVA的干式变压器，仅上海、北京等地具备批量生产能力。1985年，北京变压器厂从日本富士公司引进了环氧树脂浇注技术，并于次年完成了成套设备的安装调试工作，计划年生产干式变压器

表 1-2 S₉ 系列与 SL₇ 用铜量比较表

额定容量 (kVA)	导 线 用 量 (kg)		S ₉ 比 SL ₇ 的用线量增加		S ₉ 比 SL ₇ 的成本增加	
	S ₉	SL ₇	kg	%	元	%
30	52.6	35.2	17.4	49.4	88.8	7.0
50	85.3	39.0	46.3	118.7	148.0	9.8
63	90.0	44.0	46.0	104.5	186.5	11.1
80	102.2	50.9	51.3	100.7	236.8	12.5
100	114.0	58.9	55.1	93.5	296.0	13.6
125	136.4	64.7	71.7	110.8	370.0	14.7
160	159.0	80.2	78.8	98.3	473.6	15.2
200	173.7	92.3	81.4	88.2	593.0	16.8
250	207.6	105.0	102.6	97.7	740.0	17.8
315	242.0	140.0	102.0	72.9	932.4	19.5
400	287.0	159.0	128.0	80.5	1184	22.1
500	322.7	178.2	144.5	81.1	1480	22.1
630	468.5	295.5	173.0	58.5	1865	20.4
800	572.8	286.7	286.1	99.8	2368	21.4
1000	585.0	378.0	207.0	54.8	2960	21.3
1250	720.3	476.5	243.8	51.2	3700	22.6
1600	834.3	504.4	329.9	65.4	4736	23.9

注 成本计算中,按铜线 10 元/kg,铝线 8.5 元/kg,电工钢片 3.2 元/kg,变压器油 1.95 元/kg 计。

的能力达 20 万 kVA。

四、SF₆ 变压器

SF₆ 变压器是一种全封闭变压器。其主要是在全密封的变压器箱体内，采用 SF₆ 作为绝缘和冷却介质，以取代传统的矿物油。SF₆ 具有良好的绝缘性能与热稳定性能，由于其无味、无毒、不易燃、能防爆、防火，所以在电器制造中得到了普遍的应用和迅速的发展。

早在 1956 年，美国奇异公司研制成功了一台电压为 69kV、容量为 2000kVA 的 SF₆ 变压器，到 60 年代，SF₆ 变压器的生产技术已日趋成熟，1963 年，日本也制成了一台 50kVA 的 SF₆ 变压器，由于认识到 SF₆ 变压器的实用价值，三菱、东芝等公司曾为这种变压器的开发投入了很大的力量。仅在 1983、1984 两年内，日本生产的 SF₆ 变压器容量计达 20000kVA，其中相当一部分远销世界各地。

1982 年，在全国城市电网装备工作会议上，对有关厂家、院校和科研单位提出了试制 SF₆ 变压器的要求。1986 年常州变压器厂与西安交大合作完成了 SQ—200/10kV SF₆ 变压器的试制工作，北京变压器生产厂家与清华大学合作，研制了 SQ—500/10kV 的 SF₆ 变压器，但还不具备成批生产能力。

除了上述之外，近年来硅油变压器、超导变压器、Amorphous 变压器也都获得了相应的发展。

五、变压器经济运行的意义

现在我国电力系统正向大电网、大电厂、大机组、超高压、高度自动化的方向迅速地发展，全网正在转换经营机制，加强科学管理，降损节能，为把我国电力网建设成现代化的电力网而努力奋斗！

变压器经济运行是降低电力网损耗的有效的、廉价的措施之一，因为以变压器经济运行来降低网络损耗，只是在寻求以运行方式的改变来获得节约电能的效益，无需增加辅助投资。

变压器经济运行所包含的内容是多方面的，诸如，变压器最佳容量的确定，变压器并列经济运行，分列经济运行，躲峰、填谷状态下经济运行，经济运行区的划分、网络调压状态下经济运行，以及变压器群经济运行等。本书的目的则是要讨论变压器在这些情况下经济运行的方法，同时，对变压器经济运行的计算机管理给予充分的注意。

第二节 变压器技术参数

在讨论变压器最佳容量确定和经济运行时，要涉及到许多参数。其主要有四个参数：即空载有功损失、短路有功损失、空载无功损失、短路无功损失。空载有功和短路有功损失在变压器铭牌中已标定出来，而空载无功损失和短路无功损失在变压器铭牌中没有标定，需要由空载电流的百分值 $I_0\%$ 和短路电压的百分值 $U_k\%$ 计算出来。在这一节中主要给出这种计算关系。

一、变压器空载有功损失

所谓变压器的空载有功损失，系指变压器在额定电压和额定频率下，变压器的二次侧不带负荷时的有功损失。因为变压器在空载条件下，它的一次绕组的电流数值很小，因此，其铜损也很小，故通常将变压器的空载有功损失近似地认为等于变压器的铁损。

铁损是由于变压器铁芯中磁通的交变所引起的损失。铁

损包括磁滞损失和涡流损失两部分，其中大约 80% 是磁滞损失，余下的为涡流损失。为了降低磁滞损失，多采用磁滞回线所包围面积小的硅钢片，例如，S₉ 系列的变压器则采用 DQ147—30 晶粒取向的优质硅钢片，其质量相当于日本所产 Z10—30 型硅钢片的性能。为了降低涡流损失，常采用加大硅钢片的电阻率和将硅钢片制薄的方法。变压器空载有功损失 P_0 的大小可由下式决定

$$P_0 = P_M + P_R = K_M f B_m^n V + K_R f^2 B_m^2 V \quad (1-1)$$

式中 P_M ——磁滞损失；

P_R ——涡流损失；

B_m ——变压器铁芯磁通密度最大值；

f ——频率；

n ——磁滞系数；

V ——铁芯体积；

K_M 、 K_R ——系数。

由式 (1-1) 可知：变压器的空载有功损失 P_0 与电源频率和铁芯中的磁通密度、铁芯体积有密切的关系。

二、短路有功损失

所谓短路有功损失 P_K 系指变压器一次绕组加低压、二次绕组短路，且当绕组中流过额定电流时所测得的损失。由于一次绕组加低压，变压器铁损很小，因此变压器的短路损失 P_K 可以认为等于额定工作状态下的铜损。

变压器的短路损失主要是一、二次绕组的电阻损失，其约占短路损失 70% 以上，但是，在短路损失中还包括导体的涡流损失和附加杂散损失。导体的阻值与温度有关，因此，短路损失也受温度影响。变压器铭牌上所给定的 P_K 值指的是温度为 75℃ 条件下，额定电流所产生的损失。

三、空载电流和空载无功损失

空载电流主要是用来建立磁通，并维持一次绕组中的低量损耗，所以常把空载电流称为励磁电流。

当变压器一侧绕组开路，另一侧加以额定电压时，在加电压侧绕组中产生的电流称为空载电流 I_0 。图 1-1 中给出了变压器一次侧加额定电压、二次侧开路时一次绕组中流过空载

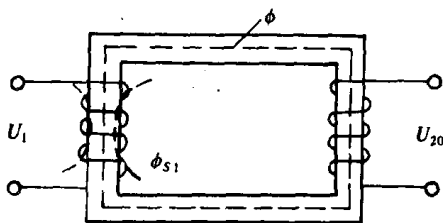


图 1-1 变压器空载电路图

电流。变压器空载电流的大小与变压器铁芯中的磁通密度有密切关系，磁通密度越大，所需空载电流越大，但是这个关系却不是成正比的，而是由变压器铁芯的磁化曲线决定的非

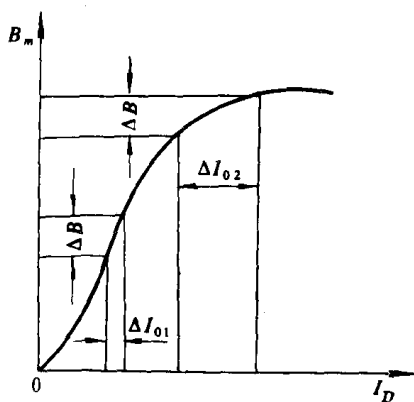


图 1-2 变压器磁化曲线

线性关系，如图 1-2 所示。从图 1-2 中可见，当铁芯在趋于饱和状态下，铁芯中磁通密度的变化 ΔB 所需的空载电流增量 ΔI_{02} 比铁芯不饱和时磁通密度变化同样一个 ΔB 所需空载电流的增量 ΔI_{01} 要大得多。而且由变压器电势方程式可知

$$U_1 = 4.44 f w B_m S \quad (1-2)$$

式中 w ——一次绕组匝数；

S ——铁芯截面。

因此, B_m 在一定比例尺上代表电源电压 U_1 , 这就不难说明铁芯在饱和状态下, 如果电压增加, 空载电流 I_0 增加是很快。变压器铁芯的磁化曲线与铁芯材料有关, 优质铁芯材料有良好的导磁率, 其空载电流很小。

在计算中空载电流百分值 $I_0\%$ 是由变压器铭牌标定的, 由 $I_0\%$ 可以确定空载所消耗的无功功率, 其步骤如下:

(1) 空载电流百分值 $I_0\%$ 的表示式为

$$I_0\% = \frac{I_0}{I_e} \times 100\% \quad (1-3)$$

(2) 将两边乘以额定电压有

$$I_0\% I_e U_e \times 10^{-2} = Q_0$$

从而进一步得出

$$Q_0 = I_0\% S_e \times 10^{-2} \quad (1-4)$$

式中 Q_0 ——空载无功功率, kvar;

S_e ——变压器额定容量, kVA;

U_e 、 I_e ——变压器的额定电压和额定电流。

式 (1-4) 便是空载所消耗的无功功率与空载电流百分值 $I_0\%$ 的换算关系。

四、短路电压

如果将变压器二次绕组短路, 一次绕组加电源电压, 此时, 当二次绕组流过额定电流时, 则在一次绕组两端所测得的电压值称为变压器的短路电压, 并以 U_K 表示之。如果将短路电压以百分数表示, 即

$$U_K\% = \frac{U_K}{U_e} \times 100\% \quad (1-5)$$

则将上式两边乘以额定电流 I_e 后, 便可得到变压器在短

路或负载状态下所消耗的无功功率 Q_K ，即

$$Q_K = U_K \% S_e \times 10^{-2} \quad (\text{kvar}) \quad (1-6)$$

五、变压器损失率的计算

在讨论变压器最佳容量确定和经济运行时，主要考虑的问题是变压器的有功损失、无功损失和损失率问题。变压器的功率损失主要由两部分组成：空载损失和负载损失。空载损失是与负载大小无关的固定损失，通常是容量较大的变压器，其空载损失大。可是负载损失却是与负载电流成平方关系的可变损失。在 T 小时内，变压器的有功损失可用下式计算

$$\Delta P = P_0 + \beta^2 P_K \quad (\text{kW}) \quad (1-7)$$

$$\beta = \frac{P}{P_r} = \frac{A_T}{T S_e \cos \varphi_T} \quad (1-8)$$

式中 A_T —— T 时间内的电量， $\text{kW} \cdot \text{h}$ ；

$\cos \varphi_T$ —— T 时间内平均功率因数。

变压器效率和有功损失率可以写成下式

$$\eta = \frac{\beta S_e \cos \varphi_T}{\beta S_e \cos \varphi_T + P_0 + \beta^2 P_K} \times 100\% \quad (1-9)$$

$$\Delta P \% = \frac{\Delta P}{P_1} = \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{\beta S_e \cos \varphi_T + P_0 + \beta^2 P_K} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中 P_1 ——变压器输入的有功功率， kW ；

S_e ——额定容量， kVA 。

在 T 小时内，变压器负荷将是不断变化的，因此，在计算变压器损失时，应计及负载波动的影响，故在作动态计算时，引入负载波动系数 K_T ，以考虑这种影响，则功率损失可