

电力变压器运行 损耗与节能

刘丽平 牛迎水 编著



运行变压器，**损耗**有规律
预控负载区，**节能**增效益



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电力变压器运行 损耗与节能

刘丽平 牛迎水 编著

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

变压器运行中的电能损耗占电网总电能损耗的 25%~45%。探索研究变压器的损耗特点和规律,提出节能降耗措施,是本书的主要目的。

本书主要以国标中不同系列变压器技术参数为依据,以变压器经济运行理论为指导,按照不同电压等级,对常用变压器运行时的功率损耗特点、规律以图、表的形式展示,一目了然、方便快捷,同时,给出了不同的节能策略与节能措施,是一部图文并茂、实用性强的变压器运行节能指导书。

本书既是变压器运行管理人员开展节能增效的良师益友,也是各级电力企业和用电单位开展变压器损耗理论计算和能效管理的工具书,对相关培训机构、研究机构、节能爱好者也具有较大参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电力变压器运行损耗与节能 / 刘丽平, 牛迎水编著. —北京: 中国电力出版社, 2018.2
ISBN 978-7-5198-1738-1

I. ①电… II. ①刘… ②牛… III. ①电力变压器-输送损耗-研究②电力变压器-节能-研究
IV. ①TM41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 027144 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 崔素媛 (cuisuyuan@gmail.com)

责任校对: 王开云

装帧设计: 张 娟

责任印制: 杨晓东

印 刷: 三河市航远印刷有限公司

版 次: 2018 年 3 月第一版

印 次: 2018 年 3 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 18.5

字 数: 436 千字

印 数: 0001—2000 册

定 价: 58.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前言

●●●●

随着我国经济持续地高速发展,电力需求持续快速增长,电力网规模迅速扩张,变压器作为电力转换与分配的关键电气设备,大规模、广泛应用于经济社会各行各业。变压器在运行中要产生大量损耗,其损耗量约占电网总损耗量的 25%~45%,因此开展变压器运行损耗研究,总结归纳变压器运行损耗特点与规律,指导运行和管理人员合理使用变压器,提高变压器运行效率,对于节能降耗、降本增效具有重要意义。

本书共 11 章。第 1 章介绍了变压器损耗基础知识,第 2~9 章分别介绍了 10kV、20kV、35kV、66kV、110kV、220kV、330kV 和 500kV 电压等级变压器的损耗特性和节能措施,第 1~9 章主要依据相关国标规定的技术参数。第 10 章主要依据实际运行的变压器铭牌参数,对 750kV 和 1000kV 电压等级变压器运行时的损耗特点、规律以图、表格形式展示,指出了节能策略,总结了节能措施。第 11 章以 220kV 变压器为例,对不同双绕组和三绕组变压器之间的技术性能进行计算比较及优化运行分析。只要知道变压器型号容量、参数及负载区间(运行功率范围),就可以快速查出变压器损耗率范围,并获得相应的节能策略和节能措施,一目了然、方便快捷。

“运行变压器,损耗有规律;预控负载区,节能增效益”。希望本书对读者开展变压器节能管理、降本增效能够有所启示和帮助。

本书第 1.1、1.3 节和第 2~6 章由国网河南省电力公司鹤壁供电公司牛迎水高级工程师编写,第 1.2、1.4 节和第 7~11 章由中国电力科学研究院刘丽平教授级高级工程师编写,并负责全书的统稿工作。华北电力大学硕士研究生张义涛参与了本书部分例题计算和数据整理工作。

本书获得了中国电力科学研究院有限公司专著出版基金资助。在编写过程中得到了中国电力科学研究院系统所及国网河南省电力公司鹤壁供电公司各位领导和同事们的支持和帮助,在此,对他们的关心和帮助表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,不足之处在所难免,恳请广大读者和同仁批评指正。

目 录

○●●●

前言

第 1 章 变压器损耗基础知识	1
1.1 变压器运行条件与经济运行	1
1.1.1 变压器的运行条件	1
1.1.2 变压器经济运行的概念	4
1.1.3 变压器经济运行管理	6
1.2 变压器的等值电路及参数计算	7
1.2.1 双绕组变压器等值电路和参数计算	7
1.2.2 三绕组变压器等值电路和参数计算	9
1.2.3 自耦变压器等值电路和参数计算	12
1.2.4 变压器有功损耗和无功损耗的精确计算	12
1.3 变压器的有功损耗和无功损耗工程计算	14
1.3.1 变压器运行时的有功损耗工程计算	14
1.3.2 变压器运行时的无功损耗工程计算	15
1.3.3 变压器无功消耗引起电网的有功损耗率计算	16
1.4 变压器的综合功率损耗	17
1.4.1 变压器综合功率损耗算法	17
1.4.2 双绕组变压器综合功率损耗计算	17
1.4.3 三绕组变压器综合功率损耗计算	19
第 2 章 10 (6) kV 变压器的损耗与节能	20
2.1 10 (6) kV 配变损耗的计算依据	20
2.1.1 配变损耗的计算式	20
2.1.2 配变损耗计算参数确定	21
2.1.3 配变损耗查看说明	22
2.2 10 (6) kV 油浸式配变的损耗与节能	22
2.2.1 S9 系列油浸式配变的损耗	22
2.2.2 S11 系列油浸式配变的损耗	27
2.2.3 S13 系列油浸式配变的损耗	31

2.2.4	SH15 系列油浸式配变的损耗	36
2.3	10 (6) kV 干式配变的损耗与节能	40
2.3.1	SC9 系列干式配变	40
2.3.2	SC10 系列干式配变	43
2.3.3	SCH15 系列干式配变	46
2.4	10kV 配变的损耗特点与节能措施	50
2.4.1	油浸式配变的损耗特点与节能措施	50
2.4.2	干式配变的损耗特点与节能措施	56
2.4.3	10kV 典型型号配变的损耗对比分析	61
第 3 章	20kV 变压器的损耗与节能	67
3.1	20kV 变压器运行损耗计算说明	67
3.1.1	配变运行损耗计算及其参数确定	67
3.1.2	配变运行损耗查看说明	68
3.2	20kV 油浸式配变的运行损耗与节能	68
3.2.1	S11 系列油浸式配变的损耗	68
3.2.2	D11 系列单相油浸式配变的损耗	73
3.2.3	SH15 系列油浸式非晶合金配变的损耗	76
3.3	20kV 干式配变的运行损耗与节能	82
3.3.1	SC9 系列干式配变的损耗	82
3.3.2	SC10 系列干式配变的损耗	87
3.4	20kV 配变的损耗特点与节能措施	93
3.4.1	油浸式配变的损耗特点与节能措施	93
3.4.2	干式配变的损耗特点与节能措施	98
3.4.3	20kV 不同型号的配变损耗对比分析	101
第 4 章	35kV 变压器的运行损耗与节能	106
4.1	35kV 变压器运行损耗典型计算的规定	106
4.1.1	变压器运行损耗计算及其参数确定	106
4.1.2	变压器运行损耗查看说明	106
4.2	S9 系列 35kV 变压器的损耗	107
4.2.1	S9 系列 35kV 无励磁调压变压器的损耗	107
4.2.2	SZ9 系列 35kV 有载调压变压器的损耗	113
4.3	S11 系列 35kV 变压器的损耗	116
4.3.1	S11 系列 35kV 无励磁调压变压器的损耗	116
4.3.2	SZ11 系列 35kV 有载调压变压器的损耗	122
4.4	35kV 变压器的节能措施	125
4.4.1	S9 系列变压器节能措施	125
4.4.2	S11 系列变压器节能措施	129

第 5 章	66kV 变压器的运行损耗与节能	134
5.1	66kV 变压器运行损耗典型计算的规定	134
5.1.1	变压器运行损耗计算及其参数确定	134
5.1.2	变压器运行损耗查看说明	134
5.2	66kV 变压器的损耗	135
5.2.1	S9 系列 66kV 无励磁调压变压器的损耗	135
5.2.2	S11 系列 66kV 无励磁调压变压器的损耗	139
5.3	66kV 变压器的节能措施	144
5.3.1	S9 系列变压器节能措施	144
5.3.2	S11 系列变压器节能措施	147
第 6 章	110kV 变压器的损耗与节能	152
6.1	110kV 变压器损耗的计算依据	152
6.1.1	三绕组变压器有功损耗的计算	152
6.1.2	三绕组变压器有功损耗典型计算的规定	153
6.1.3	三绕组变压器有功损耗典型计算案例	154
6.1.4	三绕组变压器无功消耗引起的受电网有功损耗计算	156
6.2	SZ9 系列 110kV 变压器的损耗与节能	157
6.2.1	SZ9 系列双绕组有载调压变压器的损耗	157
6.2.2	SSZ9 系列三绕组有载调压变压器的损耗	161
6.3	SZ11 系列 110kV 变压器的损耗与节能	164
6.3.1	SZ11 系列双绕组有载调压变压器的损耗	164
6.3.2	SSZ11 系列三绕组有载调压变压器的损耗	167
6.4	110kV 变压器的节能措施	171
6.4.1	SZ9 系列变压器节能措施	171
6.4.2	SZ11 系列变压器节能措施	172
第 7 章	220kV 变压器的损耗与节能	176
7.1	220kV 变压器额定损耗变化规律与节能	176
7.1.1	S9 系列双绕组变压器	176
7.1.2	S9 系列三绕组变压器	177
7.1.3	OSS9 系列三相三绕组自耦变压器	178
7.1.4	S11 系列双绕组变压器	179
7.1.5	SS11 系列三绕组变压器	180
7.1.6	OSS11 系列三绕组自耦变压器	181
7.2	220kV 变压器的运行损耗的计算条件确定	182
7.2.1	220kV 三绕组变压器负载分配对有功损耗的影响	182
7.2.2	变压器电源侧的功率因数对其有功损耗的影响	185

7.2.3	220kV 变压器运行损耗计算条件	185
7.2.4	变压器运行损耗查看说明	186
7.3	S9 系列 220kV 变压器的损耗与节能	186
7.3.1	低压为 6.3~35kV 级 S9 系列三相双绕组变压器	186
7.3.2	低压为 66kV 级 S9 系列三相双绕组变压器	192
7.3.3	SS9 系列三相三绕组变压器	196
7.4	S11 系列 220kV 变压器的损耗与节能	200
7.4.1	低压为 6.3~35kV 级 S11 三相双绕组变压器	200
7.4.2	低压为 66kV 级 S11 系列三相双绕组变压器	205
7.4.3	SS11 系列三相三绕组普通变压器	209
7.5	220kV 自耦变压器的损耗与节能	213
第 8 章	330kV 变压器的损耗与节能	218
8.1	330kV 变压器额定损耗变化规律与节能	218
8.1.1	S9 系列三相双绕组变压器	218
8.1.2	S9 系列三相三绕组变压器	219
8.1.3	S9 系列三相三绕组自耦变压器	220
8.1.4	S11 系列三相双绕组变压器	222
8.1.5	SS11 系列三相三绕组变压器	223
8.1.6	OSS11 系列三相三绕组自耦变压器	223
8.2	330kV 变压器的运行损耗的计算条件确定	225
8.2.1	330kV 变压器运行损耗计算条件	225
8.2.2	变压器运行损耗查看说明	226
8.3	S9 系列 330kV 三相双绕组变压器的损耗与节能	226
8.4	S11 系列 330kV 三相双绕组变压器的损耗与节能	230
8.5	三相三绕组无励磁调压电力变压器的损耗与节能	234
第 9 章	500kV 变压器的损耗与节能	239
9.1	500kV 变压器额定损耗变化规律与节能	239
9.1.1	S9 系列三相双绕组变压器	239
9.1.2	OD9 系列单相三绕组自耦变压器	240
9.1.3	S11 系列三相双绕组变压器	241
9.1.4	OD11 系列单相三绕组有载调压自耦变压器	241
9.2	500kV 变压器的运行损耗的计算条件确定	242
9.2.1	500kV 变压器运行损耗计算条件	242
9.2.2	变压器运行损耗查看说明	243
9.3	S9 系列 500kV 三相双绕组变压器的损耗与节能	243
9.4	S11 系列 500kV 三相双绕组变压器的损耗与节能	247
9.5	500kV 三绕组无励磁调压电力变压器的损耗与节能	253

第 10 章	750kV 及 1000kV 变压器的损耗与节能	259
10.1	750kV 变压器的损耗与节能	259
10.2	1000kV 变压器的损耗与节能	262
第 11 章	变压器技术性能比较及优化运行分析	264
11.1	容量相等的双绕组变压器间技术性能比较及优化运行	264
11.2	容量不相等的双绕组变压器间技术性能比较	268
11.3	容量相等的三绕组变压器间技术性能比较	274
11.4	容量不相等的三绕组变压器间技术性能比较	280
11.5	优化运行后的节能效果计算	285
参考文献		286

第 1 章

变压器损耗基础知识

1.1 变压器运行条件与经济运行

变压器运行需要具备一定的条件，在运行过程中，变压器会产生功率损耗，并且其损耗大小随着负载大小的不同而有规律地变化。

1.1.1 变压器的运行条件

1. 一般运行条件

(1) 运行电压

变压器的运行电压一般不应高于该运行分接额定电压的 105%，且不得超过系统最高运行电压。对于特殊的使用情况（例如变压器的有功功率可以在任何方向流通），允许在不超过 110%的额定电压下运行；对电流与电压的相互关系如无特殊要求，当负载电流为额定电流的 K ($K \leq 1$) 倍时，按公式 $U(\%) = 110 - 5K^2$ 对电压 U 加以限制。

在《标准电压》(GB/T 156—2007) 中规定了不同电压等级交流三相系统中的变压器最高电压，见表 1-1（表格中括号内数据为用户有要求时使用）。

表 1-1 不同电压等级的交流三相系统中变压器的最高电压 kV

序号	变压器最高电压	系统标称电压	序号	变压器最高电压	系统标称电压
1	3.6	3 (3.3)	7	126 (123)	110
2	7.2	6	8	252 (245)	220
3	12	10	9	363	330
4	24	20	10	550	500
5	40.5	35	11	800	750
6	72.5	66	12	1100	1000

(2) 分接容量

无励磁调压变压器在额定电压 $\pm 5\%$ 范围内改换分接位置运行时，其额定容量不变。如为

-7.5%和-10%分接时，其容量按制造厂的规定；如无制造厂规定，则容量应相应降低 2.5%和 5%。有载调压变压器各分接位置的容量，按制造厂的规定。

(3) 顶层油温

根据《电力变压器运行规程》(DL/T 572—2010)，油浸式变压器顶层油温一般不应超过表 1-2 规定 (制造厂有规定的按制造厂规定)。当冷却介质温度较低时，顶层油温也相应降低。自然循环冷却变压器的顶层油温一般不宜经常超过 85℃。

表 1-2 油浸式变压器顶层油温在额定电压下的一般限值 ℃

冷却方式	冷却介质最高温度	最高顶层油温
自然循环自冷、风冷	40	95
强迫油循环风冷	40	85
强迫油循环水冷	30	70

经改进结构或改变冷却方式的变压器，必要时应通过温升试验确定其负载能力。

(4) 三相负载不平衡

当变压器三相负载不平衡时，应监视最大一相的电流。接线为 YNyn0 的大、中型变压器允许的中性线电流，按制造厂及有关规定。接线为 Yyn0(或 YNyn0)和 YZn11(或 YNZn11)的配电变压器，中性线电流的允许值分别为额定电流的 25%和 40%，或按制造厂的规定。

2. 负载电流和温度限值

(1) 负载状态

变压器的负载状态通常用负载率来表示。一定时间内，变压器输出的平均视在功率与变压器的额定容量之比，称为变压器的平均负载系数，若用百分数表示，就称为负载率。

全年各小时整点供电负荷中的最大(小)值称为年最大(小)负荷。年最大(小)负荷与变压器的额定有功功率之比的百分数称为年最大(小)负载率。

(2) 变压器的轻载、重载与过载

根据《城市配电网运行水平和供电能力评估导则》(Q/DGW 565—2010)规定，变压器的轻载与重载标准规定如下。

1) 轻载变压器：年最大负载率小于或等于 20%的变压器。

2) 重载变压器：年最大负载率达到或超过 80%且持续 2h 以上的变压器。可选取年最大负荷日的变压器负载率作为单台变压器的年最大负载率。

3) 过载变压器：年最大负载率超过了 100%且持续 2h 以上的变压器。

(3) 变压器运行时的电流和温度限值

变压器的正常预期寿命值通常是以设计的环境温度和额定运行条件下的连续工况为基础的。当负载超过铭牌额定值和/或环境温度高于设计环境温度时，变压器将遭受一定程度的危险，并且加速老化。通常，变压器的过载通过电流和温度限制来实现。

根据《电力变压器 第 7 部分：油浸式电力变压器负载导则》(GB/T 1094.7—2008)，正常周期性负载条件下，当超铭牌额定值负载运行时，不应超过表 1-3 规定的所有的限值。

表 1-3 超铭牌额定值负载时的电流和温度限值

类别 (正常周期性负载)	配电变压器 ($S_r \leq 2500\text{kVA}$)	中型变压器 ($S_r \leq 100\text{MVA}$)	大型变压器 ($S_r > 100\text{MVA}$)
电流 ^① (标么值 p.u.)	1.5	1.5	1.3
绕组热点温度和与纤维绝缘材料接触的 金属部件的温度(℃)	120	120	120
其他金属部件的热点温度(与油、 芳族聚酰胺纸、玻璃纤维材料接触)(℃)	140	140	140
顶层油温(℃)	105	105	105

变压器在额定使用条件下，全年可按额定电流运行。变压器允许在平均相对老化率小于或等于 1 的情况下，周期性地超额定电流运行。但在外界环境温度较高，变压器有较严重的缺陷（如冷却系统不正常、严重漏油、局部过热、油中溶解气体分析结果异常、绝缘有缺陷等）或运行时间超过设计年限 20 年时，负载接近或超过铭牌值将加速变压器老化与损坏，不利于变压器安全可靠运行。因此，变压器应该尽量避免过载运行。

(4) 干式电力变压器运行时的电流和温度限值

对于干式电力变压器，根据《电力变压器 第 12 部分：干式电力变压器负载导则》(GB/T 1094.12—2013)，当负载超过铭牌额定值时，特别是当负载周期短，且为重复性负载时，绕组热点温度不应超过表 1-4 所列限值，电流的幅值要限定到 1.5 倍额定电流，以避免在绕组上产生机械损伤。干式变压器满载运行时，其每个绕组的温升均不应超过表 1-4 中所列出的平均温升限值。

表 1-4 负载超过铭牌额定值时的电流和温度限值

绝缘系统温度(℃)	最大电流(p.u.)	最高热点温度(℃)	额定电流下的绕组平均温升限值(K)
105(A)	1.5	130	60
120(E)	1.5	145	75
130(B)	1.5	155	80
155(F)	1.5	180	100
180(H)	1.5	205	125
200	1.5	225	135
220	1.5	245	150

注：温度和电流的限值不是同时有效；计算表明，在表格中的最高热点温度下，一台新变压器的寿命只有几千小时。

3. 变压器的并列运行

并列（并联）运行是指并联的各变压器的两个绕组，采用同名端子对端子的直接相连方式下的运行。根据《电力变压器应用导则》(GB/T 13499—2002) 以及《电力变压器运行规程》(DL/T 572—2010) 规定，变压器并列运行的基本条件如下：

- (1) 联结组标号相同，即时钟序数要严格相等，以确保具有相同的相位关系。
- (2) 电压和电压比相同，或差值不得超过±0.5%；调压范围与每级电压要相同。

(3) 短路阻抗相同, 或短路阻抗值偏差小于 $\pm 10\%$, 还应注意极限正分接位置短路阻抗与极限负分接位置短路阻抗要分别相同。阻抗电压不等或电压比不等的变压器, 任何一台变压器除满足 GB/T 1094.7 和制造厂规定外, 每台变压器并列运行绕组的环流应满足制造厂的要求。短路阻抗不同的变压器, 可适当提高短路阻抗较高的变压器的二次电压, 使并列运行变压器的容量均能充分利用。

(4) 容量比在 0.5~2.0 之间, 当两台变压器容量比大于 1:2 时, 不宜并列运行。

(5) 频率相同。

(6) 新装或变动过内外连接线的变压器, 并列运行前必须重新核定相位。

4. 变压器的寿命

在外部冷却空气为 20°C , 变压器以额定电流运行, 以某种温度等级的绝缘材料发生热老化而损坏时, 规定变压器的寿命一般为 20 年。

对于油浸式电力变压器, 在绕组热点温度为 98°C 下相对热老化率为 1, 此热点温度与“在环境温度 20°C 和绕组热点温升为 78K 下运行”相对应。

对于干式电力变压器, 其环境温度也为 20°C , 而热点温度取决于绝缘材料的温度等级, 其温度限值按表 1-4 中的规定。

在额定热点温度的基础上, 每增加 6°C (油浸式) 或 10°C (干式), 其热寿命减少一半, 反之, 增加一倍。

1.1.2 变压器经济运行的概念

根据《电力变压器经济运行》(GB/T 13462—2008), 变压器经济运行是指在确保安全可靠运行及满足供电量需求的基础上, 通过对变压器进行合理配置, 对变压器运行方式进行优化选择, 对变压器负载实施经济调整, 从而最大限度地降低变压器的电能损耗。

1. 基本概念

(1) 综合功率损耗 ΔP_z

变压器运行中有功功率损耗与因无功功率消耗使其受电网增加的有功功率损耗之和。

(2) 综合功率损耗率 $\Delta P_z\%$

变压器综合功率损耗与其输入的有功功率之比的百分数。

(3) 无功经济当量 K_Q

变压器无功消耗每增加或减少 1kvar 时引起受电网有功功率损耗增加或减少的量, 它反映穿越电网的无功功率所引起电网的有功功率损耗。当变压器全年受入端功率因数已补偿到 0.9 及以上时, 无功经济当量 K_Q 取 0.04kW/kvar 。

(4) 平均负载系数 β

一定时间内, 变压器平均输出的视在功率与变压器的额定容量之比。

(5) 负荷率 γ

即视在负荷率, 指一定时间内平均负载视在功率与最大负载视在功率之比的百分率。负荷率用于计算或查找变压器负荷波动损耗系数。

(6) 形状系数 K_f

某工作日 (或代表日) 关口计量点的方均根电流与其平均电流之比, 简称形状系数, 由

于它反映了负载随着时间变化而变化的曲线形象状态,故称为形状系数。

(7) 负载波动损耗系数 K_T

一定时间内,负载波动条件下的变压器负载损耗与平均负载条件下的负载损耗之比。负载波动损耗系数 K_T 与负荷曲线形状系数 K_f 的关系为: $K_T = K_f^2$

(8) 经济容量

在变压器寿命周期内,经济效益最佳的变压器设计容量。从经济角度看,在同样的负载条件下,选用单台大容量变压器比用数台小容量变压器经济得多。

(9) 变压器经济使用期

变压器用户对所选配电变压器经济运行年限的预期。作技术经济评价分析计算时,一般采用 20 年。

(10) 年最大负载利用小时数 $T_{\max}$

变压器一年中输送的电能 (kWh) 与其年尖峰负荷 (kW) 之比。

(11) 年最大负载损耗小时数 τ

变压器的年电能损耗量 (kWh) 与一年中所发生的最大损耗 (kW) 之比。

2. 经济运行区划分

对于双绕组变压器,其经济运行区划分规定如下。

(1) 经济负载系数 β_{LZ}

变压器在运行中,其综合功率损耗率随着负载系数呈非线性变化,在其非线性曲线中,损耗率最低点对应的负载系数称为综合功率经济负载系数。

若双绕组变压器的综合功率空载损耗为 P_{0Z} , 综合功率额定负载功率损耗为 P_{KZ} , 负载波动损耗系数为 K_T , 则其经济负载系数 β_{LZ} 为

$$\beta_{LZ} = \sqrt{\frac{P_{0Z}}{K_T P_{KZ}}} \quad (1-1)$$

(2) 经济运行区 ($\beta_{LZ}^2 \leq \beta \leq 1$)

经济运行区是指综合功率损耗率等于或低于变压器额定负载时的综合功率损耗率的负载区间。变压器在额定负载运行为经济运行区上限,负载系数为 1; 与上限额定综合功率损耗率相等的另一点为经济运行区下限,负载系数为 β_{LZ}^2 , 变压器经济运行区间为 $\beta_{LZ}^2 \leq \beta \leq 1$, 如图 1-1 所示。

(3) 最佳经济运行区 ($1.33 \beta_{LZ}^2 \leq \beta \leq 0.75$)

最佳经济运行区是指综合功率损耗率接近变压器经济负载系数时的综合功率损耗率的负载区间。变压器在 75% 负载运行为最佳经济运行区上限,负载系数为 0.75; 与上限额定综合功率损耗率相等的另一点为经济运行区下限,最佳经济运行区下限负载系数为 $1.33 \beta_{LZ}^2$, 最佳经济运行区范围为 $1.33 \beta_{LZ}^2 \leq \beta \leq 0.75$, 如图 1-1 所示。

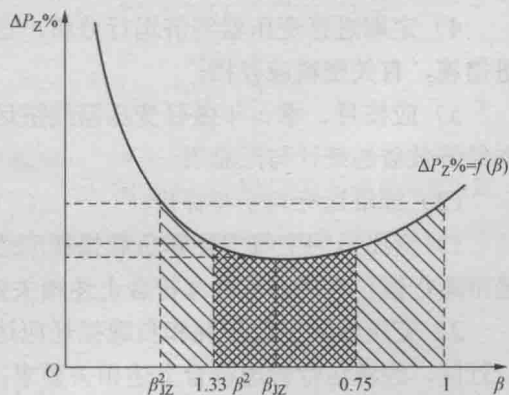


图 1-1 双绕组变压器综合功率运行区间划分

(4) 非经济运行区 ($0 \leq \beta < \beta_{LZ}^2$ 或 $\beta > 1$)

综合功率损耗率高于变压器额定负载时的综合功率损耗率及其对应的低负载运行区间, 即非经济运行区范围为 $0 \leq \beta < \beta_{LZ}^2$, 或 $\beta > 1$ 。

1.1.3 变压器经济运行管理

1. 经济运行的基本要求

1) 选用或更新的变压器应符合《电力变压器》(GB 1094—2013)、《油浸式电力变压器技术参数和要求》(GB/T 6451—2015) 和《干式电力变压器技术参数和要求》(GB/T 10228—2015) 的要求, 变压器空载损耗和负载损耗应符合《三相配电变压器能效限定值及能效等级》(GB 20052—2013) 等相关能效标准。要淘汰高能耗变压器、更新超过服役年限的变压器。

2) 应合理选择变压器组合的容量和台数。选择寿命期内经济效益最佳的容量和台数; 根据《配电变压器能效技术经济评价导则》(DL/T 985—2012) 对变压器选型进行技术经济评价, 优先选用节电效果大、经济效益好、投资回收期短的变压器。

3) 变压器的投运台数应按照负载情况, 从安全、经济原则出发, 合理安排。应优化选择变压器综合功率损耗最低的经济运行方式。

4) 可以相互调配负载的变压器, 应合理分配、调整变压器负载, 使变压器在综合功率损耗最低的经济运行区间运行。

5) 应调整变压器负载曲线, 提高负载率, 采用削峰填谷 (一定时间内, 把变压器的高峰负载移到低谷时段运行, 称为削峰填谷)、调整变压器相间不平衡负载等措施, 降低综合功率损耗。

2. 经济运行管理

(1) 变压器的经济运行管理

1) 应配置变压器的电能计量仪表, 完善测量手段。

2) 应记录变压器日常运行数据及典型代表日负荷, 为变压器经济运行提供数据。

3) 应健全变压器经济运行文件管理, 保存变压器原始资料; 变压器大修、改造后的试验数据应存入变压器档案中。

4) 定期进行变压器经济运行分析, 在保证变压器安全运行和供电质量的基础上提出改进措施, 有关资料应存档。

5) 应按月、季、年做好变压器经济运行工作的分析与总结, 并编写变压器的节能效果与经济效益的统计与汇总表。

(2) 经济运行判别与评价

1) 变压器的空载损耗和负载损耗应达到能效标准所规定的节能评价价值, 且运行在最佳经济运行区, 经济运行管理符合上述相关要求, 则认定变压器运行经济。

2) 变压器的空载损耗和负载损耗应达到能效标准所规定的能效限定值, 且运行在经济运行区, 经济运行管理符合上述相关要求, 则认定变压器运行合理。

3) 变压器的空载损耗和负载损耗未能达到能效标准所规定的能效限定值或运行在非经济运行区, 则认定变压器运行不经济。

3. 变压器额定容量的经济选择

根据《电力变压器选用导则》(GB/T 17468—2008)及相关理论,不同容量的变压器,在电压等级、短路阻抗、结构型式、设计原则、导线电流密度和铁心密度等相同的条件下,它们之间存在如下近似关系:

- 1) 变压器的容量正比于线性尺寸的4次方。
- 2) 变压器的有效材料重量正比于容量的 $3/4$ 次方。
- 3) 变压器单位容量消耗的有效材料正比于容量的 $-1/4$ 次方。
- 4) 当变压器的导线电流密度和铁心磁通密度保持不变时,有效材料中的损耗与重量成正比,即总损耗正比于容量的 $3/4$ 次方。
- 5) 变压器单位容量的损耗正比于容量的 $-1/4$ 次方。
- 6) 变压器的制造成本正比于容量的 $3/4$ 次方。
- 7) 变压器的损耗率与其额定容量成反比;空载损耗率与负载系数成反比;负载损耗率与负载系数成正比。

因此,从经济角度看,在同样的负载条件下,选用单台大容量变压器比用数台小容量变压器经济得多。

1.2 变压器的等值电路及参数计算

要准确计算变压器的有功损耗和无功损耗,就要明确变压器各侧功率、电压和电流之间的关系,需要建立变压器的等值电路。对于正常运行的电力系统,只要建立变压器的单相等值电路。

1.2.1 双绕组变压器等值电路和参数计算

(1) 双绕组变压器的等值电路

正常运行时三相变压器的单相等值电路如图1-2所示,其中, R 、 X 为变压器绕组等值电阻和等值漏抗; G_m 、 B_m 为变压器励磁绕组的电导和电纳。通过变压器的短路试验和空载试验结果数据,可以计算出 R 、 X 、 G_m 、 B_m 四个参数的数值。

(2) 短路试验计算绕组的电阻和漏抗

变压器的短路试验是将一侧绕组(例如2侧)三相短接,在另一侧(例如1侧)加上可调节的三相对称电压,逐渐增加电压使电流达到额定值 I_{1r} (2侧为 I_{2r})。

这时测出三相变压器消耗的总有功率称为短路损耗功率 P_k ,同时测得1侧所加的线电压值 U_{1k} ,称为短路电压。短路电压 U_{1k} 除以额定电压 U_{1r} 的百分数,即短路电压百分数 $U_k\%$,算式为

$$U_k\% = \frac{U_{1k}}{U_{1r}} \times 100 \quad (1-2)$$

对于同一电压等级类型相同的变压器,容量增加,短路损耗 P_k 增加;容量相同,材料相

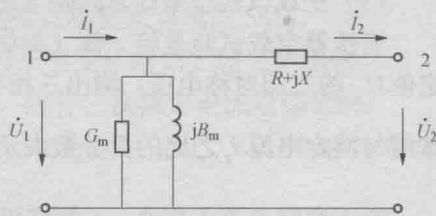


图 1-2 双绕组变压器单相等值电路

同, 普通变压器比自耦变压器的短路损耗 P_k 大。

短路电压百分数 $U_k\%$ 的变化规律是随着电压等级的升高 $U_k\%$ 逐渐增加。10kV 配电变压器的 $U_k\% \approx 4 \sim 5$; 35kV 双绕组变压器的 $U_k\% \approx 6.5 \sim 8$; 110kV 变压器的 $U_k\% \approx 10.5$; 220kV 的 $U_k\% \approx 12 \sim 14$; 500kV 变压器的 $U_k\% \approx 14 \sim 16$ 。

由于短路电压 U_{1k} 比一次侧额定电压 U_{1r} 小很多, 这时的励磁电流及铁心损耗可以忽略不计, 所以短路损耗 P_k 可看作是变压器流过一次侧额定电流 I_{1r} 时高、低压三相绕组的总铜损, 即

$$P_k = 3I_{1r}^2 R \times 10^{-3} \text{ (kW)} \quad (1-3)$$

由于三相变压器的额定容量 S_r 定义为 $S_r = \sqrt{3}U_{1r}I_{1r} = \sqrt{3}U_{2r}I_{2r}$, 因此有

$$P_k = 3 \times \left(\frac{S_r}{\sqrt{3}U_{1r}} \right)^2 R \times 10^{-3} = \frac{S_r^2}{U_{1r}^2} R \times 10^{-3} \text{ (kW)} \quad (1-4)$$

若 S_r 用 MVA、 U_{1r} 用 kV 表示, 则由式 (1-4) 可推出归算到高压侧的变压器绕组的等值电阻 R 为

$$R = \frac{P_k}{1000} \times \frac{U_{1r}^2}{S_r^2} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (1-5)$$

变压器绕组的漏抗 X 比电阻 R 大许多倍, 例如 110kV 2.5MVA 的变压器 $X/R \approx 9$, 25MVA 的变压器 $X/R \approx 16$, 相应的 $\frac{\sqrt{R^2 + X^2}}{X}$ 分别约为 1.006 和 1.002, 因此短路电压和 X 上的电压降相差甚小。所以短路电压百分数 $U_k\%$ 为

$$U_k\% = \frac{U_{1k}}{U_{1r}} \times 100\% = \frac{\sqrt{3}I_{1r}X}{U_{1r}} \times 100\% = \frac{S_r}{U_{1r}^2} X \times 100\% \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 可推出归算到高压侧的变压器绕组的等值电抗 X 为

$$X = \frac{U_k\% U_{1r}^2}{100 S_r} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (1-7)$$

(3) 空载试验结果计算励磁支路的电导和电纳

变压器空载试验是将一侧 (例如 2 侧) 三相开路, 另一侧 (例如 1 侧) 加上线电压为额定值 U_{1r} 的三相对称电压, 测出三相有功空载损耗 P_0 和空载电流 I_0 (励磁电流), 空载电流 I_0 常用与额定电流 I_r 之比的百分数表示, 称为空载电流百分数 $I_0\%$, 即 $I_0\% = \frac{I_0}{I_r} \times 100\%$ 。

由于空载电流 I_0 很小, 1 侧绕组的电阻损耗可以略去不计, P_0 非常接近于铁心损耗, 所以变压器励磁绕组的电导 G_m 为

$$G_m = \frac{P_0}{U_{1r}^2} \times 10^{-3} \text{ (S)} \quad (1-8)$$

式中, P_0 单位为 kW。

励磁支路导纳中, 电导 G_m 远小于电纳 B_m , 空载电流与 B_m 支路中的电流有效值几乎相等, 因此