

## 三圈变压器经济运行参数的计算研究

王亚忠<sup>1</sup>，单晓红<sup>1</sup>，李伟祥<sup>1</sup>，张继中<sup>2</sup>

(1. 广西电力职业技术学院, 广西 南宁 530007; 2. 广西电网公司河池供电局, 广西 河池 547000)

**摘要:** 在三绕组电力变压器总损耗的一般表达式的基础上, 引入了三绕组电力变压器等效负载损耗的概念, 使三绕组变压器总损耗的表达式与双圈变压器总损耗的表达式形式上相同, 并且推导出了三圈变压器经济负荷功率、经济负荷率、经济运行效率的计算公式。以一台容量比为 100/100/50 的 110 kV 三绕组电力变压器为实际算例说明了上述公式的实际用法。

**关键词:** 三绕组电力变压器; 等效负载损耗; 经济负荷功率; 经济负荷率; 经济运行效率

### Calculation research of economical operation parameters of three-winding transformer

WANG Ya-zhong<sup>1</sup>, SHAN Xiao-hong<sup>1</sup>, LI Wei-xiang<sup>1</sup>, ZHANG Ji-zhong<sup>2</sup>

(1. Guangxi Electric Power Institute of Vocational Training, Nanning 530007, China;  
2. Hechi Power Supply Bureau, Hechi 547000, China)

**Abstract:** Based on the general expressions of the three-winding transformer total loss, this paper draws-in the concept of equivalent load loss of the three-winding transformer to enable the three-winding transformer total loss to have the same expressions as two winding transformers, furthermore to derive the calculation formula of economic load power, economic load rate, efficiency of economic operations of the three-winding transformer. It explains the practice usage of the formula above-mentioned with a capacity ratio 100/100/50 of 110kV three-winding transformer as a practice calculation example.

**Key words:** three-winding transformer; equivalent load loss; economic load power; economic load rate; efficiency of economic operations

中图分类号: TM744 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)02-0075-04

## 0 引言

在电力系统中有大量的三绕组电力变压器在运行, 因此三绕组电力变压器的经济运行是电力变压器经济运行的重要组成部分。但是人们一直以来关心双绕组电力变压器经济运行的研究并且取得了较丰硕的研究成果, 而对三绕组电力变压器的研究较少。文献[1]指出:“双绕组变压器经济运行的定量计算不适用于三绕组变压器, 这是因为双绕组变压器的功率损耗是负载的单元函数, 而三绕组变压器的功率损耗是负载的多元函数”。笔者发现三绕组变压器经济运行的有关参数的表达式不够明确或过于复杂。文献[11]指出:“电网的运行电压对变压器的损耗影响很大。变压器过电压 5%运行时, 一般铁损将增加 15%左右。”本文的目的就是在引入三绕组电力变压器“等效负载损耗”的概念的基础上,

简化并明确三绕组电力变压器经济运行计算的方法与思路, 推导出三绕组电力变压器简明实用的经济运行参数计算公式, 并同时考虑电压、电流变化对变压器经济运行参数的影响。在计算机如此发达的今天, 这种同时考虑电压、电流变化的变压器经济运行对变电站实施三圈变压器经济运行的计算和指导调节方向方面具有实用价值。三绕组变压器按容量比分为四种: 100/100/100, 100/50/100, 100/100/50 和 100/50/50 (分裂变压器)。本文导出的公式适用于以上任何一种变压器经济运行的计算。

## 1 三圈变压器的等效负载损耗

三圈变压器归算到一次侧的等值电路如图 1 所示, 其总的有功损耗为

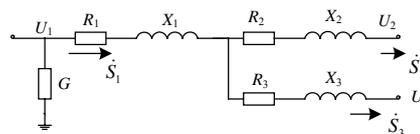


图 1 三绕组变压器等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of three-winding transformer

基金项目: 广西壮族自治区教育厅校企合作资助项目  
(2008081x287)

$$\Delta P = U_1^2 G + \frac{S_1^2}{U_1^2} \cdot R_1 + \frac{S_2^2}{U_2^2} \cdot R_2 + \frac{S_3^2}{U_3^2} \cdot R_3 \quad (1)$$

式中： $G = \frac{\Delta P_0}{U_N^2}$ ,  $R_i = \frac{U_N^2}{S_N^2} \cdot \Delta P_{ki} (i=1 \sim 3)$  代入式 (1) 得

$$\Delta P = \Delta P_0 U_*^2 + \frac{S_*^2}{U_*^2} \cdot \Delta P_{K1} + \frac{S_{2*}^2}{U_{2*}^2} \cdot \Delta P_{K2} + \frac{S_{3*}^2}{U_{3*}^2} \cdot \Delta P_{K3} \quad (2)$$

式中： $S_* = \frac{S_1}{S_{1N}} = \frac{S}{S_N}$  为一次绕组负荷系数；

$U_* = \frac{U_1}{U_{1N}} = \frac{U}{U_N}$  为一次绕组实际运行电压标么值；

$U_{2*} = \frac{U_2}{U_N}$ ,  $U_{2'} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{U_N}{U_{2N}}$ ； $U_2$  为归算到一次侧的

二次绕组实际运行电压； $U_2'$  为变压器二次绕组实

际运行电压； $U_{3*} = \frac{U_3}{U_N}$ ,  $U_{3'} = \frac{U_{1N}}{U_{3N}} = \frac{U_N}{U_{3N}}$ ； $U_3$  为归算

到一次侧的三次绕组实际运行电压； $U_3'$  为变压器

三次绕组实际运行电压。  
令  $d_2 = \frac{U_2}{U} = \frac{U_{2*}}{U_*}$ ,  $d_3 = \frac{U_3}{U} = \frac{U_{3*}}{U_*}$  为二、三次

绕组的运行电压系数； $c_2 = \frac{S_2}{S_1} = \frac{S_2}{S} = \frac{S_{2*}}{S_*}$ ，

$c_3 = \frac{S_3}{S_1} = \frac{S_3}{S} = \frac{S_{3*}}{S_*}$  为二、三次绕组的负荷分配系

数，则式 (2) 可写为

$$\Delta P = \Delta P_0 U_*^2 + \frac{S_*^2}{U_*^2} \cdot \Delta P_{K1} + \frac{S_{2*}^2 \cdot c_2^2}{U_{2*}^2 \cdot d_2^2} \cdot \Delta P_{K2} + \frac{S_{3*}^2 \cdot c_3^2}{U_{3*}^2 \cdot d_3^2} \cdot \Delta P_{K3} = \quad (3)$$

$$\Delta P_0 U_*^2 + \frac{S_*^2}{U_*^2} (\Delta P_{K1} + \frac{c_2^2}{d_2^2} \cdot \Delta P_{K2} + \frac{c_3^2}{d_3^2} \cdot \Delta P_{K3})$$

实际运行中， $d_2$ 、 $d_3$  可根据变压器母线电压表的读数算出， $c_2$ 、 $c_3$  可根据变压器二、三次侧的有功表、无功表的读数算出。即实际运行中  $d_2$ 、 $d_3$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  均为已知数。

令  $\Delta P_K = \Delta P_{K1} + \frac{c_2^2}{d_2^2} \cdot \Delta P_{K2} + \frac{c_3^2}{d_3^2} \cdot \Delta P_{K3}$  为三圈变

压器的等效负载损耗，则式 (3) 可简化为

$$\Delta P = \Delta P_0 U_*^2 + \frac{S_*^2}{U_*^2} \cdot \Delta P_K \quad (4)$$

由式 (4) 可以看出：引入三圈变压器等效负载损耗的概念后，三圈变压器总损耗的表达式与双圈变压器总损耗的表达式完全相同。因此，有关双圈变压器经济运行的研究成果可以照搬到三圈变

器。

## 2 三圈变压器的最小损耗运行曲线

令  $\Delta P' = 0$ ，可得三圈变压器最小运行曲线

$$S_* = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_K}} \cdot U_*^2 \quad (5)$$

由式 (5) 可推导出三圈变压器的经济负荷为

$$S_j = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_K}} \cdot \frac{U^2}{U_N^2} \cdot S_N \quad (6)$$

由式 (6) 可知：欲提高三圈变压器的经济负荷，应尽量减小三圈变压器的等效负载损耗和提高运行电压。

## 3 三圈变压器的经济负荷率

由负荷率  $\beta = \frac{S}{S_N}$  和式 (5) 可知，三圈变压器

的经济负荷率  $\beta_j = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_K}} \cdot U_*^2$  (7)

## 4 三圈变压器经济运行效率

### 4.1 三圈变压器运行效率的一般表达式

$$\eta = \frac{P_2 + P_3}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = \frac{S \cos \varphi - \Delta P}{S \cos \varphi} = 1 - \frac{\Delta P}{S \cos \varphi} = \quad (8)$$

$$1 - \frac{\Delta P}{\beta S_N \cos \varphi} = 1 - \frac{\Delta P_0 U_*^2 + \Delta P_K \beta^2 U_*^2}{\beta S_N \cos \varphi}$$

### 4.2 三圈变压器的经济运行效率

将  $\eta$  看成  $\beta$  和  $U_*$  的二元函数，分别求偏导数如下：

$$\frac{\partial \eta}{\partial \beta} = -\frac{1}{S_N \cos \varphi} (-\beta^{-2} \Delta P_0 U_*^2 + \Delta P_K U_*^2)$$

令  $\frac{\partial \eta}{\partial \beta} = 0$ ，得  $\Delta P_K U_*^{-2} = \beta^{-2} \Delta P_0 U_*^2$

所以  $\beta^2 = \frac{\Delta P_0}{\Delta P_K} \cdot U_*^4$ ，得三圈变压器的经济运行负载

$$\text{系数为 } \beta_j = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_K}} \cdot U_*^2 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial U_*} = -\frac{1}{S_N \cos \varphi} (2\Delta P_0 U_* \beta^{-1} - 2U_*^{-3} \Delta P_K \beta)$$

令  $\frac{\partial \eta}{\partial U_*} = 0$ ，得  $2\Delta P_0 U_* \beta^{-1} = 2U_*^{-3} \Delta P_K \beta$

同样得三圈变压器的经济运行表达式如式 (9)

一样。将式(9)代入式(8), 得三圈变压器的经济

$$\text{运行效率 } \eta_j = 1 - \frac{2\sqrt{\Delta P_0 \Delta P_K}}{S_N \cos \varphi} \quad (10)$$

由式(10)可知: 欲提高三圈变压器的经济运行效率应尽量减小三圈变压器的等效负载损耗和提高运行的功率因数。

## 5 算例

某降压变电所有一台 110 kV 的三绕组变压器, 型号为 SFSL<sub>1</sub>-20000/110, 容量比 100/100/50, 额定变比  $\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{110}{38.5}$ ,  $\frac{U_{1N}}{U_{3N}} = \frac{110}{10.5}$ , 空载损耗

$\Delta P_0 = 50.2(\text{kW})$ , 负载损耗  $\Delta P_{K12} = 152.8(\text{kW})$ ,  $\Delta P'_{K23} = 47(\text{kW})$ ,  $\Delta P'_{K31} = 52(\text{kW})$ , 主变三侧实际运行电压为  $U_1 = 109(\text{kV})$ ,  $U'_{21} = 37(\text{kV})$ ,  $U'_{31} = 10.4(\text{kV})$ , 主变三侧实际运行负载功率  $S_1 = 19\ 000(\text{kVA})$ ,  $S_2 = 13\ 300(\text{kVA})$ ,  $S_3 = 5\ 700(\text{kVA})$ , 试求该变压器的: (1) 等效负载损耗; (2) 总有功功率损耗; (3) 效率; (4) 变压器经济负荷功率; (5) 经济负荷率; (6) 经济负荷效率。

解: (1) 等效负载损耗

$$\Delta P_{K23} = \left(\frac{S_{2N}}{S_{3N}}\right)^2 \cdot \Delta P'_{K23}, \text{ 所以得}$$

$$\Delta P_{K23} = 4 \times 47 = 188(\text{kW})$$

$$\Delta P_{K31} = \left(\frac{S_{1N}}{S_{3N}}\right)^2 \cdot \Delta P'_{K31}, \text{ 所以得}$$

$$\Delta P_{K31} = 4 \times 52 = 208(\text{kW})$$

$$\Delta P_{K1} = \frac{1}{2}(\Delta P_{K12} - \Delta P_{K23} + \Delta P_{K31}) =$$

$$\frac{1}{2}(152.8 - 188 + 208) = 86(\text{kW})$$

$$\Delta P_{K2} = \frac{1}{2}(\Delta P_{K12} + \Delta P_{K23} - \Delta P_{K31}) =$$

$$\frac{1}{2}(152.8 + 188 - 208) = 66.4(\text{kW})$$

$$\Delta P_{K3} = \frac{1}{2}(\Delta P_{K23} + \Delta P_{K31} - \Delta P_{K12}) =$$

$$\frac{1}{2}(188 + 208 - 152.8) = 121.6(\text{kW})$$

二、三次绕组归算至一次侧的电压:

$$\frac{U_2}{U'_2} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}, \text{ 所以得}$$

$$U_2 = \frac{110}{38.5} \times 37 = 105.7(\text{kV}),$$

$$\frac{U_3}{U'_3} = \frac{U_{1N}}{U_{3N}}, \text{ 所以得}$$

$$U_3 = \frac{110}{10.5} \times 10.4 = 108.95(\text{kV})$$

运行电压系数:

$$d_2 = \frac{U_2}{U} = \frac{105.7}{109} = 0.97, \quad d_3 = \frac{U_3}{U} = \frac{108.95}{109} \approx 1$$

二、三绕组负荷分配系数:

$$c_2 = \frac{S_2}{S_1} = \frac{13300}{19000} = 0.7, \quad c_3 = \frac{S_3}{S_1} = \frac{5700}{19000} = 0.3$$

变压器等效负荷损耗

$$\begin{aligned} \Delta P_K &= \Delta P_{K1} + \frac{c_2^2}{d_2^2} \cdot \Delta P_{K2} + \frac{c_3^2}{d_3^2} \cdot \Delta P_{K3} = \\ &= 86 + \frac{0.7^2}{0.97^2} \times 66.4 + \frac{0.3^2}{1^2} \times 121.6 = 131.5(\text{kW}) \end{aligned}$$

(2) 变压器总有功损耗

$$\Delta P = \Delta P_0 U_*^2 + \frac{S_*^2}{U_*^2} \cdot \Delta P_K =$$

$$50.2 \times \left(\frac{109}{110}\right)^2 + \frac{(19\ 000/20\ 000)^2}{(109/110)^2} \times 131.5 = 170.16(\text{kW})$$

(3) 变压器运行效率

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{S \cos \varphi} = 1 - \frac{170.16}{19000 \times 0.92} = 99\%$$

(4) 变压器经济负荷功率

$$\begin{aligned} S_j &= \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_K}} \cdot \frac{U}{U_N} \cdot S_N = \\ &= \sqrt{\frac{50.2}{131.5}} \times \left(\frac{109}{110}\right)^2 \times 20\ 000 = 12\ 133.5(\text{kVA}) \end{aligned}$$

(5) 变压器经济负荷率

$$\beta_j = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_K}} \cdot \left(\frac{U}{U_N}\right)^2 = \sqrt{\frac{50.2}{131.5}} \times \left(\frac{109}{110}\right)^2 = 60.7\%$$

(6) 三圈变压器的经济运行效率

$$\eta_j = 1 - \frac{2\sqrt{\Delta P_0 \Delta P_K}}{S_N \cos \varphi} = 1 - \frac{2 \times \sqrt{50.2 \times 131.5}}{20\ 000 \times 0.92} = 99.1\%$$

## 6 结束语

综上所述, 三绕组电力变压器的等效负载损耗

$$\Delta P_K = \Delta P_{K1} + \left(\frac{c_2}{d_2}\right)^2 \cdot \Delta P_{K2} + \left(\frac{c_3}{d_3}\right)^2 \cdot \Delta P_{K3}。 \text{ 引入等效负}$$

载损耗后, 使三绕组电力变压器的经济运行参数的计算方法与双绕组电力变压器类同。三绕组电力变

压器的经济负荷功率  $S_j = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_K}} \cdot \left(\frac{U}{U_N}\right)^2 \cdot S_N$ , 经济

负载率  $\beta_j = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_K}} \cdot \left(\frac{U}{U_N}\right)^2$  , 经济运行效率

$\eta_j = 1 - \frac{2\sqrt{\Delta P_0 \Delta P_K}}{S_N \cos \varphi}$  。从算例中可以看出, SFSL<sub>1</sub>—

20000/110 型三圈变压器经济负荷率为 60.7%, 经济运行效率为 99.1%, 当负荷率为 95%时, 其实际运行效率为 99%, 说明三圈变压器的运行效率是相当高的。

参考文献

[1] 胡景生. 变压器效能与节电技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.100-138.  
HU Jing-sheng. Efficient of Transformer and Technique of Saving Electricity[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.100-138.

[2] 王亚忠. 双绕组变压器经济负载系数研究[J]. 继电器, 2008, 36 (17): 60-61.  
WANG Ya-zhong. Research on Economy Load Factor of Two-winding Transformer[J]. Relay, 2008, 36(17): 60-61.

[3] 杜文学. 电力系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.269-270.  
DU Wen-xue. Electric Power Systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.

[4] 黄静. 电力系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.145-146.  
HUANG Jing. Electric Power Systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.145-146.

[5] 虞忠年, 陈星莺, 刘昊. 电力网电能损耗[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.  
YU Zhong-nian, CHEN Xing-ying, LIU Hao. Electric Energy Loss of the Electric Power Network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

[6] 王锡凡, 方万良, 杜正春, 等. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
WANG Xi-fan, FANG Wan-liang, DU Zheng-chun, et al.

Analysis of Modern Power System[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[7] 万千云, 赵智勇, 万英. 电力系统运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.  
WAN Qian-yun, ZHAO Zhi-yong, WAN Ying. Operating Technical of Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.

[8] 方大千. 变压器速查速算手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.  
FANG Da-qian. The Quick Check and Calculate Handbook [M]. Beijing: China Water Power Press, 2004.

[9] 雷铭. 电力网降损节能手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.  
LEI Ming. Downward Loss and Save Energy Handbook of the Transmission Network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

[10] 全德生, 金盛. 供电企业电能损耗与无功管理手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.  
QUAN De-sheng, JIN Sheng. The Electrical Energy Loss and Reactive Power Mmanagement Handbook of the Power Supply Company[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

[11] 许业清. 实用节电技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990.116-158.  
XU Ye-qing. Practical Technology of Saving Electricity[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1990.116-158.

收稿日期: 2009-02-09; 修回日期: 2009-03-19

作者简介:

王亚忠 (1959-), 男, 主要从事电力职业技术教育和电力系统研究; E-mail: wangyz1959@126.com  
单晓红 (1961-), 女, 本科, 实验师, 主要从事电力职业技术实验、实训教学和电气测量数据分析的研究;  
李伟祥 (1958-), 男, 本科, 工程师, 主要从事电力职业技术实训教学和电气设备检修和运行的研究。

(上接第 54 页 continued from page 54)

[10] 杨君, 王兆安, 邱关源. 并联电力有源滤波器直流侧电压的控制[J]. 电力电子技术, 1996, (4): 48-51.  
YANG Jun, WANG Zhao-an, QIN Guan-yuan. DC-side Voltage Control of Shunt Active Power Filter[J]. Power Electronics, 1996, (4): 48-51.

[11] Hideaki Fujita, Shinji Tominaga, Horifumi Akagi. Analysis and Design of DC Voltage-controlled Static Var Compensator using Quad-series Voltage-source Inverters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32 (4 ): 970-979.

收稿日期: 2009-02-21; 修回日期: 2009-05-30

作者简介:

彭晨光 (1981-), 男, 硕士, 主要研究方向为有源电力滤波器及配电网无功补偿; E-mail: pengchenguang@sohu.com  
王瑞闯 (1983-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力设备在线监测与故障诊断;  
刘连光 (1954-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行、分析与控制等方面的研究工作。