

变压器谐波损耗计算方法比较与仿真

李国栋¹, 李培², 徐永海², 姚蜀军²

(1. 天津电力科学院, 天津 300022; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 针对变压器谐波损耗问题, 对适合于估算的改进参数法、测量法和等值法进行分析, 并评述其优缺点。在不同的电压畸变率下对带有典型六脉动整流负荷的变压器的谐波损耗进行了仿真计算, 并对仿真和各种计算方法得到的谐波总损耗进行曲线拟合, 以直观比较出各种方法计算的精确度。通过仿真结果与几种不同方法的计算结果比较, 确定出在不同的电压畸变范围内较为准确的变压器谐波损耗的计算方法。

关键词: 变压器; 谐波损耗; 仿真; 方法比较

Comparison and simulation of calculation methods for transformer harmonic losses

LI Guo-dong¹, LI Pei², XU Yong-hai², YAO Shu-jun²

(1. Tianjin Electric Power Science & Research Institute, Tianjin 300022, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: For the harmonic losses, improved parameter method, measurement method and the equivalent method, which fit for estimation, are firstly summarized. Their advantages and disadvantages are simultaneously reviewed, too. The simulation of the harmonic losses of transformer with six-pulse rectifier load and the fitting curves of total harmonic losses are made under different voltage distortions, so it is intuitive to identify the accuracy of different methods. Through comparing the simulation results with other calculation results, this paper gives a more accurate method for calculating harmonic losses within different voltage distortion ranges.

Key words: transformer; harmonic losses; simulation; comparison of methods

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0063-06

0 引言

近年来, 随着电力电子技术的发展, 非线性负载得到了广泛的应用, 所带来的不良后果是谐波的问题日益严重。作为电力系统中联系不同电压等级网络不可或缺的电气设备, 变压器的谐波损耗不容忽视。根据日本中部电力公司提供的资料, 甚至认为当5次谐波含有率为10%时, 变压器的损耗比不存在谐波时增大10%^[1]。谐波不仅增大了损耗, 还会降低变压器的使用寿命。因此, 对于变压器谐波损耗进行细致的研究具有重要的意义。

国内外关于变压器谐波损耗的计算有不同的方法, 准确度各不相同。文献[2]将谐波损耗以基波损耗的附加倍数体现, 其基波损耗分为铜耗和铁耗分别计算。但铁耗中的磁滞损耗是由铁芯磁化极性反转造成的, 由磁性材料的尺寸和品质、磁通密度的最大值和交流电流的频率决定。涡流损耗与铁芯材料的尺寸, 叠片的厚度等因素有关系, 这些参数无

法从变压器的铭牌中获得。文献[3]提到的经验公式法都是根据经验数据来估算谐波损耗, 当变压器结构相差较大时会有较大偏差。文献[4]提到的方法要在小电流下实测出变压器不同谐波频率下的有效电阻, 计算出谐波损耗系数。但是试验电流小, 可能给谐波损耗系数的计算带来误差。此外, 测量方法较复杂, 需要专门的测试设备和仪器。

变压器谐波损耗计算中易于实现且应用较为广泛的有改进参数法、等值法和测量法^[5]。改进参数法中损耗的大小只与电流有关, 计算较为简单, 但不能很好地反映出电压与电流之间相角的变化, 实践中可以作为一种快速估计的方法。等值法是在60 Hz条件下, 通过实验得到的某一型号变压器内部参数拟合公式, 实践中也可以作为一种估算方法, 但是计算相对较为复杂。测量法在计算时忽略了电源的畸变, 因此结果往往偏大, 但在畸变率较小的情况下, 计算结果较为精确。本文对上述三种方法进行了介绍, 针对实例进行谐波损耗计算的分析,

确定出在不同的电源电压畸变范围内较为准确的变压器谐波损耗的计算方法。

1 谐波损耗方法比较

1.1 改进参数法

变压器的总损耗 P_{TL} 可分为铜损 P_{Cu} ，铁损 P_{Fe} 和其他杂散损耗 P_{OSL} 三部分，其中铜损又分为电阻损耗 $P(I^2R)$ 、绕组涡流损耗 P_{EC} 。只有铁损 P_{Fe} 与电压有关，其他均由电流决定。在此，忽略铁耗，直流电阻损耗 $P(I^2R)$ ，涡流损耗 P_{EC} ，杂散损耗 P_{OSL} ，合成负荷损耗 P_{LL} [6]。

当供以正弦交流电时，变压器负荷总损耗的表达式如式 (1)：

$$P_{LL} = I_R^2 R_{dc} + P_{EC-R} + P_{OSL-R} \quad (1)$$

式中： P_{LL} 为正弦交流电下的变压器负荷总损耗 (W)； I_R 为正弦交流电流的大小 (A)； P_{EC-R} 为正弦交流电下绕组的涡流损耗 (W)； P_{OSL-R} 为正弦交流电下的杂散损耗 (W)。

当供以非正弦交流电时，定义 [7]：

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} [\frac{I_h}{I_1}]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} [\frac{I_h}{I_1}]^2} \quad (2)$$

定义：

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^{0.8}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} [\frac{I_h}{I_1}]^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} [\frac{I_h}{I_1}]^{0.8}} \quad (3)$$

式中： F_{HL} 为谐波损耗因子，反映谐波电流有效值； h_{max} 为最高谐波阶次； h 为谐波阶次； I_1 为非正弦交流电的基波电流 (A)； I_h 为非正弦交流电的第 h 次谐波电流 (A)。

那么，谐波总损耗的表达式为：

$$P_{th} = \sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2 R_{dc} + P_{EC-R} F_{HL} + P_{OSL-R} F_{HL-STR} \quad (4)$$

通常 P_{EC-R} 和 P_{OSL-R} 的求取要涉及运行状态下变压器的测试电阻，但在实际运行状态下通常无法满足试验条件。所以一般只取式 (4) 中的直流电阻的损耗。一般涡流损耗和杂散损耗大约为负载损耗的 20%~30%。 K 可取为 1.25。

$$P_{th} = K \cdot \sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2 R_{dc} \quad (5)$$

谐波作用下，由于绕组肌肤效应的作用，使得变压器的直流电阻与谐波次数成一定规律变化 [8]，可对直流电阻作如下的改进 [9]：

$$R_{dc} = R_1 (c_0 + c_1 h^b + c_2 h^2) \quad (6)$$

式中： R_1 为基频下的直流电阻 (Ω)； c_0, c_1, c_2, b 为系数。

其取值范围如表 1 所示，一般有 $c_0 + c_1 + c_2 = 1$ 。

表 1 公式 (6) 中的各项系数

Tab.1 Typical values for the coefficients of Eq. (6)

	c_0	c_1	c_2	b
配电变压器	0.85~0.90	0.05~0.08	0.05~0.08	0.9~1.4
电力变压器	0.75~0.80	0.10~0.13	0.10~0.13	0.9~1.4

当变压器为三相时，则式 (5) 可改写为

$$P_{th} = 3K \cdot \sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2 R_1 (c_0 + c_1 h^b + c_2 h^2) \quad (7)$$

1.2 测量法

为了便于对变压器谐波损耗进行估算，假设：

(1) 由于系统短路容量很大，可以把母线电压看作是无畸变的正弦电压。

(2) 非线性负载阻抗远远大于系统阻抗，可看作一个谐波电流源。

(3) 一些对谐波损耗贡献不大的元件暂不考虑，如导线等。

线路中的无功补偿装置主要工作在失谐状态，不会与系统产生并联谐振，所以对于谐波来说，无功补偿装置的阻抗远远大于变压器的阻抗。由于母线电压看作是无畸变的正弦电压，在不考虑线损的情况下，变压器的谐波功率损耗等于系统用户侧发出的谐波功率，但两者方向相反。

因此，在不考虑线损的情况下，变压器总谐波损耗 P_{th} 为：

$$P_{th} = 3 \cdot \sum_{h=2}^{h_{max}} U_h I_h \cos \varphi_h \quad (8)$$

式中： U_h 表示第 h 次谐波相电压 (V)，由测量点电压通过傅立叶变换得到； I_h 表示第 h 次谐波相电流 (A)，由测量点电压通过傅立叶变换得到； φ_h 为第 h 次谐波电压与电流之间的相位差，由式 (8) 知可以通过 U_h 、 I_h 、 φ_h 等参数来计算变压器的谐波损耗，它们可在变压器低压端通过测量来获取，这样就避免求变压器的内部参数。

1.3 等值法

在不考虑铁芯磁饱和及线性等因素的影响下, 利用叠加原理, 把电源中的谐波分量看成是一系列独立的电源, 分别加到变压器上, 则对于第 h 次谐波的电压电流, 考虑谐波影响的变压器等效电路如图1所示。

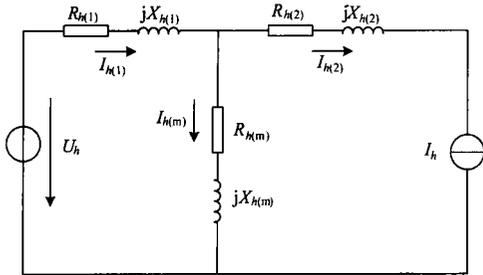


图1 第 h 次谐波影响下的变压器的等效电路
Fig.1 The h sequence harmonic equivalent circuit of transformer

图1中: h 为谐波次数, U_h 表示的是变压器原边所加的第 h 次谐波电压 (V), $R_{h(1)}$, $jX_{h(1)}$ 表示的是第 h 次谐波作用下的原边绕组的电阻和电抗 (Ω). $R_{h(2)}$, $jX_{h(2)}$ 表示的是第 h 次谐波作用下的副边绕组的电阻和电抗 (Ω). $R_{h(m)}$ 表示的是第 h 次谐波作用下的变压器的激磁电阻 (Ω), $jX_{h(m)}$ 为激磁电抗 (Ω). I_h 则为第 h 次谐波电流 (A)。

由三相变压器的短路试验可以得到^[10]:

$$\frac{R_{h(1)}}{R_{1(1)}} = 0.966360814 e^{0.000537hf} = 0.966360814 e^{0.02685h} \quad (9)$$

$$\frac{X_{h(1)}}{X_{1(1)}} = 0.99872198 + 0.153923 \times 10^{-2} h - 0.39525 \times 10^{-3} h^2 \quad (10)$$

$$\frac{R_{h(2)}}{R_{1(2)}} = 0.966360814 e^{0.000537hf} = 0.966360814 e^{0.02685h} \quad (11)$$

$$\frac{X_{h(2)}}{X_{1(2)}} = 0.99872198 + 0.153923 \times 10^{-2} h - 0.39525 \times 10^{-3} h^2 \quad (12)$$

由三相变压器的空载试验可以得到:

$$\frac{R_{h(m)}}{R_{1(m)}} = 0.7060448503 + 0.248140685 h - 0.26485 \times 10^2 h^2 \quad (13)$$

$$\frac{X_{h(m)}}{X_{1(m)}} = 1.77990695 - 0.0664264 h + 0.119525 \times 10^{-2} h^2 \quad (14)$$

因此, 第 h 次谐波在变压器上产生的损耗为:

$$P_h = 3I_{k(1)}^2 R_{h(1)} + 3I_{k(2)}^2 R_{h(2)} + 3I_{k(m)}^2 R_{h(m)} \quad (15)$$

从而, 变压器谐波总损耗为:

$$P_{th} = \sum_{h=2}^{\infty} (3I_{h(1)}^2 R_{h(1)} + 3I_{h(2)}^2 R_{h(2)} + 3I_{h(m)}^2 R_{h(m)}) \quad (16)$$

2 仿真与计算

运行状态下可以将变压器输入端和输出端测量得到的谐波总的功率之差作为变压器的总谐波损耗^[11]。本文仿真时, 在变压器的两端分别测得某相的电流和电压 (可近似认为三相平衡), 进行傅里叶分解之后得到各次谐波电压与电流的幅值和相位, 则可以求出输入功率与输出功率。某次谐波下, 变压器两端输入功率与输出功率之差即为变压器在该次谐波下的损耗。文中将该种方法的计算结果称为理论损耗。

目前, 电力系统中最重要非线性负荷是能产生谐波电流并具有相当容量的功率换流器, 各种各样的换流器遍布于电力系统的各个电压等级^[12]。由于六脉动整流电路是目前应用最为广泛的整流电路, 且为典型的谐波源, 因此本文的仿真中, 采用六脉动整流作为谐波源^[13]。

电路如图2所示, 仿真中采用某典型的配电变压器, 额定容量: 3 150 kVA; 原副边电压 10 kV/0.4 kV; 空载损耗: 5.03 kW; 负载损耗: 24.85 kW; 空载电流: 0.8%; 阻抗电压: 10%。

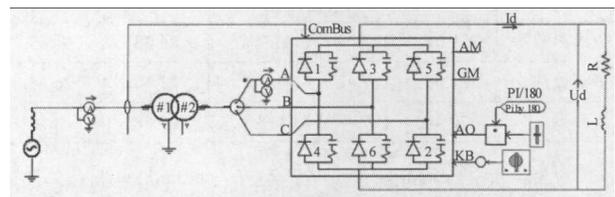


图2 六脉动整流仿真示意图

Fig.2 Schematic diagram of six-pulse rectifier

改进参数法中, 由式(6)可以看出: 系数 c_2 的选取对于计算结果影响最大。选取: $c_0 = 0.9, c_1 = c_2 = 0.05, b = 1$ (改进参数法1) 与 $c_0 = 0.85, c_1 = 0.07, c_2 = 0.08, b = 1$ (改进参数法2)。改变系统和负载参数来改变电压畸变率。图3给出了上述变压器低压侧电压畸变率变化时两种不同参数的改进参数法与理论损耗的比较曲线。

由图3得知: 当变压器低压侧的电压畸变率小于

15%时,改进参数法1的计算比较准确。当畸变率进一步增大,改进参数法2的计算误差减小。在以下的计算中,当变压器低压侧的电压畸变率小于15%时,采用改进参数法1的参数;当变压器低压侧的电压畸变率大于15%时,采用改进参数法2的参数。

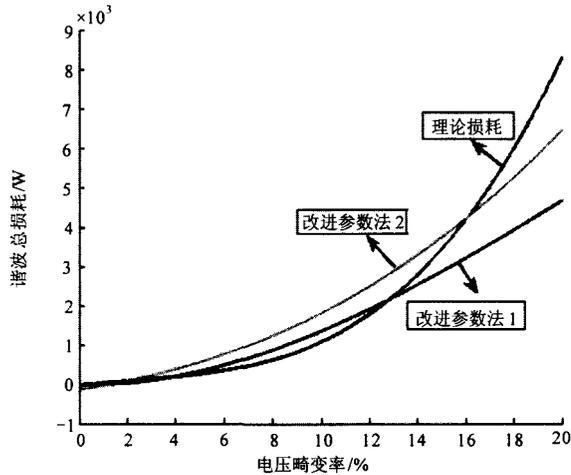


图3 系数取值不同的改进参数法比较

Fig.3 Comparison between improved parameter methods of different factors

(1) 电源中等效电感 $L=3.0$ mH, 负载中 $R=0.25 \Omega$, $L=400$ mH。用户侧基波功率为 $P_1=1702.88$ kW, 电源电压畸变率为 1.7%, 负载侧电压畸变率为 7.5%。其理论损耗与各方法计算结果比较如表 2。

表 2 不同方法计算结果比较

Tab.2 Comparison between different methods of calculation

	P_5 / W	P_7 / W	P_{11} / W	P_{13} / W	P_{Σ} / W
理论损耗	300.66	101.14	89.63	17.08	508.51
改进参数法	331.04	227.09	117.07	86.48	761.68
等值法	285.08	137.48	80.46	23.86	526.88
测量法	370.34	127.48	113.9	23.68	635.4

对于谐波总损耗的计算,等值法的误差比较小,误差为 3.62%,改进参数法和测量法的计算误差分别为 49.78%, 24.95%。对于 5, 7, 11, 13 次特征谐波,测量法的误差分别为 23.1%, 26.04%, 27.07%, 38%。通过分析各次特征谐波损耗和总的谐波损耗,可知测量法的误差相对较小。

(2) 电源中 $L=2.5$ mH。负载中 $R=0.1 \Omega$, $L=300$ mH。用户侧基波功率为 $P_1=2561.4$ kW, 电源电压的畸变率为 2.71%, 负载侧电压畸变率为 14.07%。其理论损耗与各方法计算结果比较如表 3。

对于谐波总损耗的计算,改进参数法的误差相对比较小,误差为 8.87%,等值法和测量法的计算

误差分别为 19.38%, 20.87%。对于 5, 7, 11, 13 次特征谐波,改进参数法的误差分别为 37.1%, 14.8%, 18.89%, 12%。通过分析各次特征谐波损耗和总的谐波损耗,可知改进参数法的误差相对较小。

表 3 不同方法计算结果比较

Tab.3 Comparison between different methods of calculation

	P_5 / W	P_7 / W	P_{11} / W	P_{13} / W	P_{Σ} / W
理论损耗	1156.94	1056.34	322.75	109.47	2645.51
改进参数法	1595.75	899.98	261.77	122.61	2880.11
等值法	1374.66	544.71	179.47	33.86	2132.7
测量法	1369.72	1290.23	399.15	138.5	3197.6

(3) 电源中等效电感 $L=3.0$ mH, 负载中 $R=0.1 \Omega$, $L=300$ mH, 触发角 $\alpha=10^\circ$ 。用户侧基波功率为 $P_1=2306.51$ kW, 电源电压畸变率为 3.58%, 负载侧电压畸变率为 16.13%。其理论损耗与各方法计算结果比较如表 4。

表 4 不同方法计算结果比较

Tab.4 Comparison between different methods of calculation

	P_5 / W	P_7 / W	P_{11} / W	P_{13} / W	P_{Σ} / W
理论损耗	1749.52	1364.67	670.09	272.57	4056.85
改进参数法	1712.42	1073.11	415.63	222.24	3423.4
等值法	1474.89	649.14	284.85	61.29	2470.17
测量法	2171.23	1728.11	860.04	348.85	5108.23

对于谐波总损耗的计算,改进参数法的误差相对比较小,误差为 15.6%,等值法和测量法的计算误差分别为 39.11%, 25.92%。对于 5, 7, 11, 13 次特征谐波,改进参数法的误差分别为 2.12%, 21.36%, 37.97%, 18.46%。通过分析各次特征谐波损耗和总的谐波损耗,可知改进参数法的误差相对较小。

图 4 和图 5 给出了不同电压畸变率情况下三种方法计算结果与理论损耗的比较曲线。

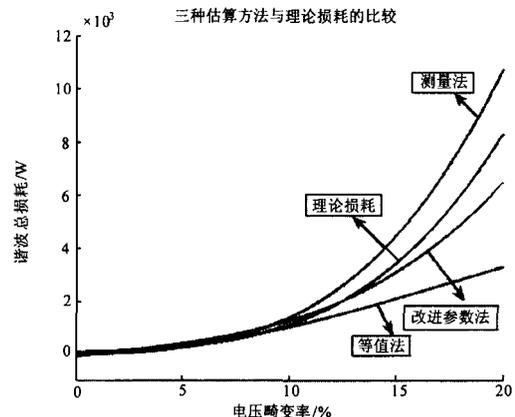


图 4 仿真数据与计算数据曲线拟合图

Fig.4 Fitting curves of simulation and calculation

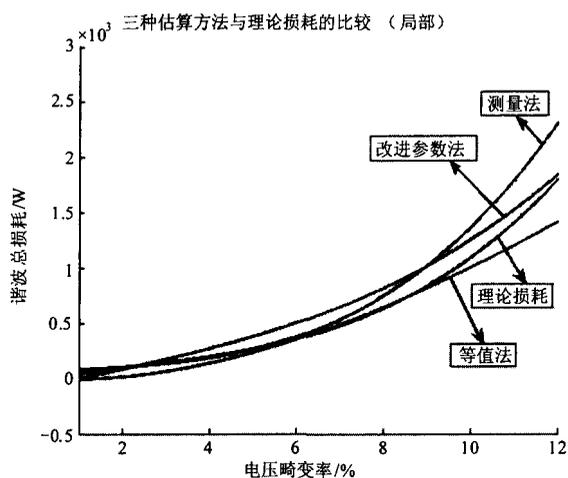


图5 仿真数据与计算数据曲线拟合图(局部)

Fig.5 Fitting curves of simulation and calculation (local)

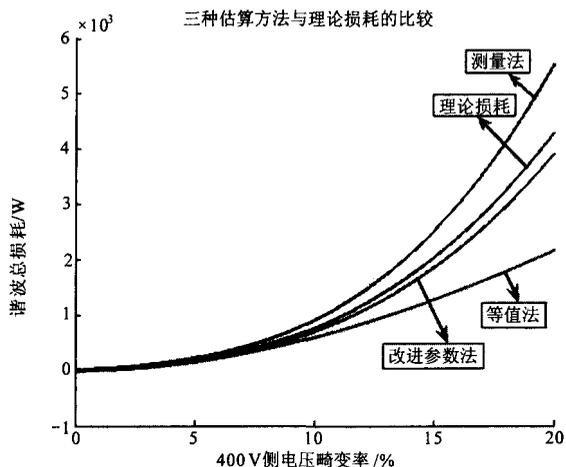


图6 仿真数据与计算数据曲线拟合图

Fig.6 Fitting curves of simulation and calculation

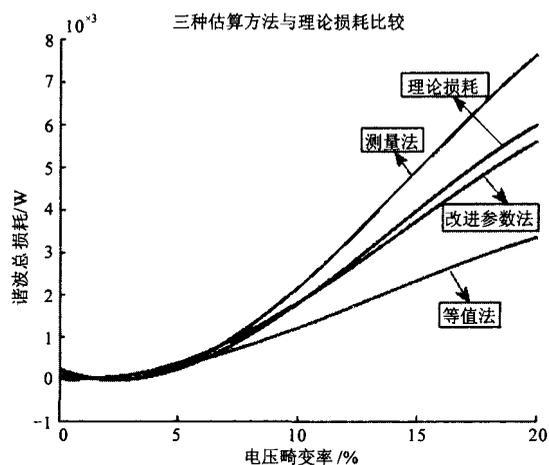


图7 仿真数据与计算数据曲线拟合图

Fig.7 Fitting curves of simulation and calculation

图6给出了另一典型配电变压器三种计算方法计算结果与理论损耗的比较曲线。该配电变压器额定容量: 1000 kVA; 原副边电压: 6 kV/0.4 kV; 空

载损耗: 1.6 kW; 负载损耗: 7.5 kW; 空载电流: 1.0%; 阻抗电压: 6%。

图7给出了另一典型配电变压器三种计算方法计算结果与理论损耗的比较曲线。该配电变压器额定容量: 1600 kVA; 原副边电压: 6 kV/0.4 kV; 空载损耗: 2.5 kW; 负载损耗: 10.91 kW; 空载电流: 1.0%; 阻抗电压: 6%。

3 仿真结果分析

通过对图4~7中的拟合曲线以及多组数据的分析可知: 计算变压器损耗的各种方法并不是在各种情况下都适用。当畸变率很小的时候, 测量法较为准确。畸变率越小, 测量法的准确度越高。从局部图看, 在负荷侧电压畸变率小于5%的情况下, 可以用测量法计算变压器的损耗。当畸变率增大, 测量法的误差将会增大, 等值法和改进参数法比测量法更为准确。从以上的拟合曲线中, 可以认为, 当负荷侧电压畸变率在5%~10%范围内, 等值法和改进参数法的计算误差都比较小, 因此都可以作为一种快速估计方法。当畸变率进一步增大, 改进参数法的计算误差减小, 在负荷侧电压畸变率大于10%的情况下, 宜采用改进参数法。但是, 电源电压的畸变率不宜太大, 否则各种方法都有较大的计算误差。

4 结论

本文对变压器谐波损耗计算中应用较为广泛的改进参数法、等值法和测量法进行了简要分析, 针对应用较为广泛的三相六脉动整流电路并采用不同的典型配电变压器进行了谐波损耗的计算与仿真, 给出了不同的电压畸变率下较为适用的计算方法, 为谐波损耗的计算工作提供参考。

参考文献

- [1] 张直平, 李芬辰. 城市电网谐波手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
ZHANG Zhi-ping, LI Fen-chen. Harmonic city guide [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [2] 汪彦良, 岳智顺, 王金全, 等. 谐波附加损耗及其降损节能分析[J]. 电气技术, 2009 (2): 15-19.
WANG Yan-liang, YUE Zhi-shun, WANG Jin-quan, et al. Analyzing the addition loss for harmonic and how to reduce it for energy-saving[J]. Electrical Engineering, 2009 (2): 15-19.
- [3] 王瑞珍, 文凯成, 刘丰. 换流变压器谐波损耗确定方法的研究[J]. 湖北电力, 2002 (1): 12-15.
WANG Rui-zhen, WEN Kai-cheng, LIU Feng. Study on

- the methods for the determination of harmonic loss on HVDC converter transformer[J]. Hubei Electric Power, 2002 (1): 12-15.
- [4] IEEE Std 1158-1991 IEEE recommended practice for determination of power losses in high-voltage direct-converter (HVDC) station[S].
- [5] 刘成君, 杨仁刚. 变压器谐波损耗的计算与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (13): 40-43, 48.
LIU Cheng-jun, YANG Ren-gang. Calculation and analysis of transformer's harmonic loss[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (13): 40-43, 48.
- [6] 陶顺, 肖湘宁. 变压器降容率及谐波损耗因子 F_{HL} 与K的比较[J]. 电工电能新技术, 2008 (1): 65-68.
TAO Shun, XIAO Xiang-ning. Comparing transformer derating computed using the harmonic loss factor F_{HL} and K-Factor[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008 (1): 65-68.
- [7] ANSI/IEEE Standard C57. 110-1986 IEEE recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents[S].
- [8] 吴竞昌. 电力系统谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
WU Jing-chang. The harmonic in power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [9] Fuchs E F, Yildirim D, Grady W M. Measurement of eddy-current loss coefficient P_{EC-R} , derating of single-phase transformers, and comparison with K-factor approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000.
- [10] Makram E F, Thompson R L, Girgis A A. A new laboratory experiment for transformer modeling in the presence of harmonic distortion using a computer controlled harmonic generator[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988.
- [11] Arri E, Locci N, Mocci F. Measurement of transformer power losses and efficiency in real working conditions[J]. IEEE Trans on Instrum Meas, 1991.
- [12] 肖湘宁, 韩民晓, 徐永海, 等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
XIAO Xiang-ning, HAN Min-xiao, XU Yong-hai, et al. Analysis and control of power quality[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [13] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 四版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
WANG Zhao-an, HUANG Jun. Power electronics [M]. Fourth edition. Beijing: China Machine Press, 2006.

收稿日期: 2009-10-08; 修回日期: 2009-12-29

作者简介:

李国栋 (1978-), 男, 工程师, 主要研究电能质量分析与控制技术, 无功优化, 电网安全稳定等;

李培 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制; E-mail: lipeifly@163.com

徐永海 (1966-), 男, 教授, 主要从事电力系统谐波、电能质量分析与控制方面的工作。

(上接第 58 页 continued from page 58)

- [13] 毕大强, 张项安, 杨恢宏, 等. 基于非饱和区域波形相关分析的励磁涌流鉴别方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (6): 16-19.
BI Da-qiang, ZHANG Xiang-an, YANG Hui-hong, et al. Correlation analysis of waveforms in non-saturation zone based method to identify magnetizing inrush in transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (6): 16-19.
- [14] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 76-95.
WANG Wei-jian. Application of power generator transformer relay protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998: 76-95.
- [15] 黄家栋, 罗伟强. 采用改进数学形态学识别变压器励磁涌流的方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (7): 98-105.
HUANG Jia-dong, LUO Wei-qiang. New algorithm to identify inrush current based on improved mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (7): 98-105.

收稿日期: 2009-10-01; 修回日期: 2009-12-04

作者简介:

孙洋 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及电力系统自动化控制; E-mail: sunnyboby2006@163.com

黄家栋 (1961-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电力系统自动化控制及计算机计算在电力系统中的应用。