

基于频变特性的变压器谐波损耗分析

蔡国伟¹, 孔令国¹, 潘超², 王建元¹, 杨德友²

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林省 吉林市 132012;

2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Harmonic Loss Analysis of Transformer Based on Frequency Dependent Characteristics

CAI Guowei¹, KONG Lingguo¹, PAN Chao², WANG Jianyuan¹, YANG Deyou²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin Province, China;

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

ABSTRACT: The widespread applications of industrial frequency conversion equipments and high frequency equipments exacerbate the harmonic pollution in power systems, thus special attentions are paid to the analysis and calculation of transformer loss under nonlinear load. On the basis of analyzing equivalent harmonic model of transformer the traditional curve fitting-based harmonic loss calculation method is modified, and in the viewpoint of eddy current field the magnetic diffusion in different materials in quasi-static magnetic field is researched and their harmonic frequency dependent characteristics are induced. Considering equivalent nonlinear parameters of transformer windings under different harmonic frequencies and the superposition of harmonic losses, the harmonic loss is modified. Both comparison results of various calculation methods and simulation results of a constructed model of frequency-variable speed control system verify the effectiveness and correctness of the proposed calculation method.

KEY WORDS: equivalent parameters; electromagnetic analysis; frequency dependent characteristics; harmonic losses

摘要: 工业变频设备和高频装置的广泛应用导致电力系统谐波污染加剧,致使非线性负荷下的变压器损耗计算与分析备受关注。研究了谐波等值模型,修正了传统曲线拟合谐波损耗算法,从涡流场角度分析模型准静态磁场中不同材料的磁扩散情况,归纳出其谐波频变特性。同时,考虑不同频率谐波下绕组的等效非线性参数和谐波损耗叠加计算,对谐波损耗进行修正。搭建了变频调速系统模型,通过各种方法的对比,验证了上述方法的正确性和有效性。

关键词: 等效参数; 电磁分析; 频变特性; 谐波损耗

0 引言

作为电力系统的核心设备,变压器的运行状态直接影响到系统的安全与稳定,其损耗对于经济运

行的影响更不容忽视。据调查,全国电网中变压器损耗约占发电总量的 3%,配电变压器损耗约占整个配电网损耗的 60%~80%^[1-2]。近年来,大量变频电器和装置等非线性负荷在工业和生活中日趋普遍,造成电网能耗激增,同时对变压器等设备造成损耗增大、温升异常、绝缘降低、寿命缩短等不良影响^[3-5],因此,变压器谐波损耗分析对其自身乃至整个系统的安全和经济运行都具有重要的实际意义。

传统的变压器损耗计算包括理论分析和实验测量。文献[6]通过大量实验获得实测数据,采用曲线拟合方法,得出各次谐波下变压器等效参数的变化曲线,并通过叠加原理计算谐波损耗。这种方法未考虑铁心饱和的影响,因此,对不同的谐波畸变率可以修正参数计算其谐波损耗。国际通用的 IEEE 标准^[7]通过实验测量和运行经验数据,计算谐波损耗,但是直流电阻损耗计算较为粗糙,涡流和杂散损耗的分配并不具适用性,且谐波损耗计算存在一定的保守性。

本文建立谐波等效参数模型,并分析绕组模型的谐波频变特性,同时考虑到各次谐波下绕组的等效非线性参数和谐波损耗叠加计算,对谐波损耗进行修正。

1 绕组谐波参数及计算模型

变压器总损耗分为铜损、铁损和其它杂散损耗。铜损分为绕组直流损耗和绕组涡流损耗,在负载运行时忽略铁损,变压器总损耗由绕组直流损耗、绕组涡流损耗和其它杂散损耗组成。

变压器各次谐波 T 型等效电路如图 1 所示。其

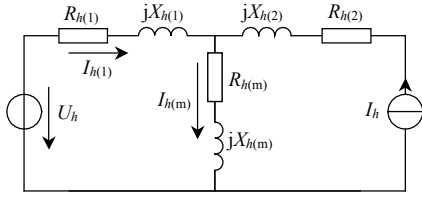


图 1 变压器 h 次谐波等效电路

Fig. 1 The h sequence harmonic equivalent circuit of transformer

中, $R_{h(1)}$ 、 $R_{h(2)}$ 、 $X_{h(1)}$ 、 $X_{h(2)}$ 分别为原、副边绕组 h 次谐波下等效电阻值和电抗值; $R_{h(m)}$ 、 $X_{h(m)}$ 为励磁绕组 h 次谐波下等效阻抗值^[8-9]。

在不考虑铁心饱和情况下, 通过谐波发生器产生各次谐波, 使其作用到变压器上, 通过空载和短路试验, 测得各次谐波作用下多组变压器的参数值。利用叠加原理把各次谐波下的损耗值代数相加得变压器谐波损耗。通过曲线拟合方法, 得出不同频率谐波下绕组的等效非线性参数

$$R_{h(1,2)} = \alpha e^{\beta h} R_{1(1,2)} \quad (1)$$

$$X_{h(1,2)} = (a_0 + a_1 h - a_2 h^2) X_{1(1,2)} \quad (2)$$

式中: $R_{1(1,2)}$ 和 $R_{h(1,2)}$ 分别为基波和 h 次谐波下原副边绕组等效电阻值; α 和 β 为指数拟合系数; $X_{1(1,2)}$ 和 $X_{h(1,2)}$ 分别为基波和 h 次谐波下原副边绕组等效电抗值; a_0 、 a_1 、 a_2 为多项式拟合系数。

利用变压器损耗计算公式, 计算变压器第 h 次谐波损耗表示为

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

式中: $R_{h(1)}$ 为原边绕组交流电阻; $R_{h(2)}$ 为副边绕组交流电阻; $I_{h(1)}$ 为原边各次谐波电流有效值; $I_{h(2)}$ 为副边各次谐波电流有效值。

因此, 变压器在带非线性负载条件下, 其含有谐波损耗的总负载损耗表示为

$$P_T = \sum_{h=1}^{h_{\max}} (3I_{h(1)}^2 R_{h(1)} + 3I_{h(2)}^2 R_{h(2)}) \quad (4)$$

IEEE/ANSI C57.110 标准将变压器总负载损耗分为直流损耗, 绕组涡流损耗和其它杂散损耗, 通过分别计算 3 种损耗叠加得到额定情况下变压器总负载损耗值为^[10-11]

$$P_{LL-R} = I_R^2 R_{dc} + P_{EC-R} + P_{OSL-R} \quad (5)$$

式中: P_{LL-R} 为总负载损耗; I_R 为额定电流; R_{dc} 为直流电阻; P_{EC-R} 为绕组额定涡流损耗; P_{OSL-R} 为额定其它杂散损耗。

变压器带有非线性负载时, 需要考虑谐波对绕组涡流损耗和其它杂散损耗的影响, 有如下定义

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} [I_h / I_1]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} [I_h / I_1]^2} \quad (6)$$

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} [I_h / I_1]^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} [I_h / I_1]^2} \quad (7)$$

式中: F_{HL} 为绕组谐波涡流损耗因数; F_{HL-STR} 为其它杂散损耗谐波损耗因数。 F_{HL} 和 F_{HL-STR} 未考虑模型参数的非线性频变特性, 而是叠加计算各次谐波的对应损耗。利用 K 系数计算的谐波损耗具有一定的保守性, 相比于 K 系数, 利用 F_{HL} 计算的变压器负载损耗则具有一定的经济性^[12]。

忽略直流电阻对谐波损耗影响, 通过 F_{HL} 和 F_{HL-STR} 对绕组涡流损耗和其它杂散损耗进行修正。谐波情况下变压器总损耗为

$$P_{LL} = I_R^2 R_{dc} + F_{HL} P_{EC-R} + F_{HL-STR} P_{OSL-R} \quad (8)$$

2 修正系数法

IEEE/ANSI C57.110 标准只提到了非线性负载电流有效值增加, 直流电阻损耗会相应的增加, 但未对其进行量化计算加入总损耗, 在非线性负载条件下, 直流电阻损耗计算比较粗略。在此, 对其修正如下

$$P_{dc} = \sum_{h=1}^{h_{\max}} (I_{h(1)}^2 R_{dc1} + I_{h(2)}^2 R_{dc2}) \quad (9)$$

式中: R_{dc1} 为原边绕组直流电阻; R_{dc2} 为副边绕组直流电阻。

变压器涡流损耗的产生, 是由于存在交变的磁通。涡流在导体中流动的过程中会产生热效应和磁场效应, 如图 2 所示。

准静态磁场环境中, 导体 Maxwell 方程的微分形式为

$$\begin{cases} \nabla \times H = \gamma E \\ \nabla \times E = -\mu(\partial H / \partial t) \end{cases} \quad (10)$$

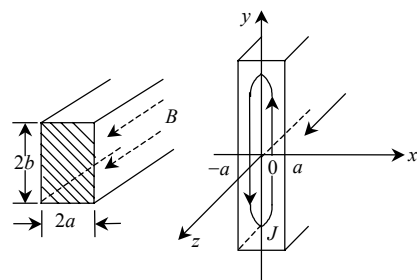


图 2 导体涡流分布

Fig. 2 Conductor eddy current distribution

式中： ∇ 为向量微分算子； H 为磁场强度； E 为电场强度； γ 和 μ 分别为铁磁材料的电导率和磁导率。

应用矢量恒等式 $\nabla \times (\nabla \times \boldsymbol{\alpha}) = \nabla(\nabla \cdot \boldsymbol{\alpha}) - \nabla^2 \boldsymbol{\alpha}$ ，得到导体中任一点磁场 H 、电场 E 和电流 J 满足如下微分方程^[13-14]

$$\begin{bmatrix} \dot{U}' \\ \dot{J}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}(kz) & Z_0 \text{sh}(kz) \\ Z_0^{-1} \text{sh}(kz) & \text{ch}(kz) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}^+ \\ \dot{J}^- \end{bmatrix} \quad (11)$$

若已知导体中心处电磁分布情况，则沿 z 方向的磁场强度 $H_z(x)$ 和 y 方向的电场强度 $E_y(x)$ 可表示为

$$\begin{cases} \dot{H}_z(x) = \frac{\dot{H}_0}{\text{ch}(Ka)} \text{ch}(Kx) \\ \dot{H}_y(x) = \frac{K\dot{H}_0}{\gamma \text{ch}(Ka)} \text{sh}(Kx) \end{cases} \quad (12)$$

式中： \dot{H}_0 为导体中心磁场强度， $K=(1+j)k$ ，令 $k=(\omega\mu\gamma/2)^{1/2}$ 。

为了便于分析导体中的电磁场分布，做出如下假设：

1) $l \gg a$, $b \gg a$ ，假定导体沿 y 、 z 方向的几何尺寸均比沿 x 方向的厚度大得多， E 、 H 等场量可近似为 x 的函数，与 y 、 z 无关。

2) 假定导体处于随时间正弦变化的均匀外磁场中，且 B 沿 z 方向，故涡流在 xOy 截面内呈闭合路径，而无 z 向分量；又 $b \gg a$ ，该平面 y 向两端的边缘效应可忽略，即 E 、 J 仅有 y 分量， E_y 、 J_y ， H 仅有 z 分量 H_z 。

分析电磁波在导体中的传播

$$\dot{J}_z = C_1 e^{-Kx} + C_2 e^{Kx} = -\frac{\dot{B}_0 K}{\mu} \text{sh}(Kx) \quad (13)$$

式中： \dot{J}_z 为 z 方向的电流密度； \dot{B}_0 为导体中心磁场密度； C_1 和 C_2 为常数。

因此，场量衰减程度与透入深度 d 有关

$$\begin{cases} K = 1/d \\ \dot{J}_z = \dot{J}_0 \text{sh}(Kx) \end{cases} \quad (14)$$

各次谐波分量在铁磁材料中产生电密的变化情况如图3所示。铁心叠片位置与磁场平行，取 $\mu_1 = 1000\mu_0$ ， $\gamma_1 = 10^7 \text{ S/m}$ ， $a = 5 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。在工频情况下，电磁场透入深度约 $7 \times 10^{-4} \text{ m}$ ，通常硅钢片厚度约 $3 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。绕组导体与磁场方向垂直，取 $\mu_2 \approx 0^{-3} \mu_1$ ， $\gamma_2 \approx 10\gamma_1$ ， $a = 5 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。在高次谐波下电流通过导体的等效面积减小，而 $d = (2/\omega\mu\gamma)^{1/2}$ ， R 的变化与 d 或 $\omega^{1/2}$ 成比例关系，可知在导体内磁场及涡流并非均匀分布。通过分析，考虑到导体内涡流非均匀分布特性，修正变压器绕组涡流损耗系数

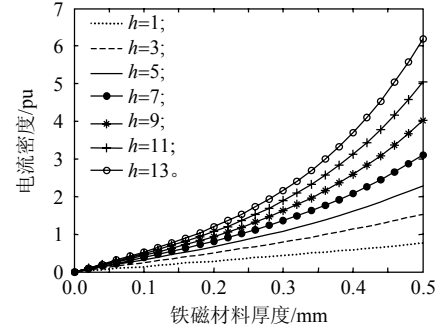


图3 各谐波分量下电流密度变化曲线

Fig. 3 Current density of the harmonic components

$$K_{HL} = \sum_{h=1}^{h_{\max}} \left[\frac{\omega_h}{\omega_R} \right]^a T_{\text{THD}h}^2 \quad (15)$$

式中： K_{HL} 为修正后绕组涡流损耗系数； ω_h 为 h 次谐波角频率； ω_R 为基波角频率； $T_{\text{THD}h}$ 为 h 次谐波的谐波畸变率值； a 为频变指数。

非线性负载条件下，修正后变压器损耗为

$$\begin{cases} P_{\text{ECN}} = (1 + K_{HL}) \times P_{\text{EC-R}} \\ P_{\text{LLN}} = P_{\text{dc}} + P_{\text{ECN}} + P_{\text{OSL}} \end{cases} \quad (16)$$

式中： P_{ECN} 为修正后绕组涡流损耗， P_{dc} 为修正后绕组直流损耗， P_{LLN} 为修正后总损耗。

3 算法对比

本文以文献[15]中变压器模型参数和谐波含量为例进行对比分析，同时应用变频调速仿真系统对各种算法进行准确性验证。变压器具体参数如表1所示，非线性负载各次谐波电流含量如表2所示。

表1 变压器参数

Tab. 1 Transformer parameters

参数	数值	参数	数值
额定容量/kVA	50	低压绕组额定电压/V	400
负载损耗/W	1250	高压绕组直流电阻/ Ω	121.5
高压绕组额定电压/kV	20	高压绕组额定电流/A	1.44
低压绕组额定电流/A	72	低压绕组直流电阻/ Ω	0.03

表2 负载各次谐波电流值

Tab. 2 The value of the load harmonic current

h	1	5	7	11	13	17	19
I_h/A	70.2	12.312	7.776 0	3.168 0	2.016 0	1.080 0	0.705 6

变频调速装置是电力系统典型的谐波源，产生 $6k \pm 1 (k=1, 2, \dots)$ 次是特征谐波， T_{THD} 约20%^[16]。本文采用变频调速系统进行仿真分析，电路原理如图4所示。变压器参数采用表1所提供的数据，变频器采用整流侧为三相桥式不控整流，逆变侧为PWM控制的通用变频器，负荷选用鼠笼式异步电动机。

利用表1、表2数据和式(5)(8)(16)计算变压器

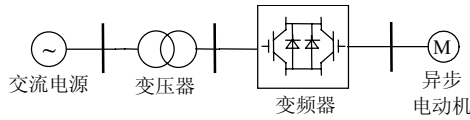


图 4 变频调速系统仿真电路图

Fig. 4 Adjustable speed drive system simulation circuit loss, calculation results and measurement values are shown in Table 3.

表 3 各种计算方法损耗计算与仿真结果
Tab. 3 Loss calculation results of different methods and simulation results

方法	曲线拟合	修正拟合	IEEE 标准	修正系数	仿真
P_{LL}/W	1313	1398	1670	1454	1421

通过各种损耗计算方法的计算值和仿真系统测量值可以看出,传统的曲线拟合方法计算的损耗值误差较大,对拟合系数修正后计算值有所改进,IEEE/ANSI C57.110 标准对变压器损耗计算具有明显保守性,本文提出的修正系数损耗计算方法所得结果逼近仿真测量值。

利用上述方法计算不同谐波畸变率值时变压器损耗,结果如图 5 所示。从图中曲线可知,IEEE/ANSI C57.110 标准计算损耗误差随谐波畸变率增大而增大,传统曲线拟合算法在 T_{THD} 小于 0.1 时损耗计算较准确, T_{THD} 大于 0.1 计算误差增大,修正拟合系数后 T_{THD} 大于 0.1 的计算精度有所提高。考虑频变特性的修正系数算法在 T_{THD} 小于 0.3 范围内的损耗计算值都比较接近于仿真测量值,又由于实际运行系统的 T_{THD} 一般都在 0~0.3 之间,因此,该计算方法比较符合实际计算要求。

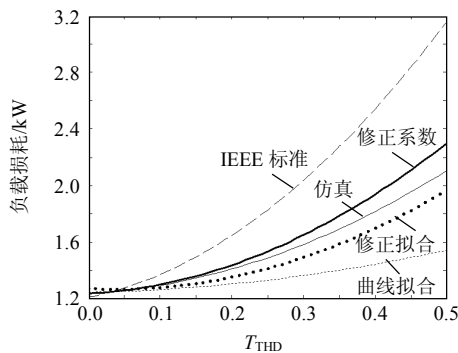


图 5 不同谐波畸变率时各种方法计算结果对比

Fig. 5 The calculation results of various calculation methods with different THD

变压器带非线性负载时,不同谐波畸变率下绕组直流损、杂散损耗和绕组涡流损耗如图 6 所示。绕组的损耗增加主要由绕组的谐波涡流损耗引起。当谐波畸变率增加时,变压器直流损耗和杂散损耗对其总损耗影响较小,主要有绕组涡流损耗决定其总损耗的增加趋势,这与 IEEE/ANSI C57.110 标准一致。

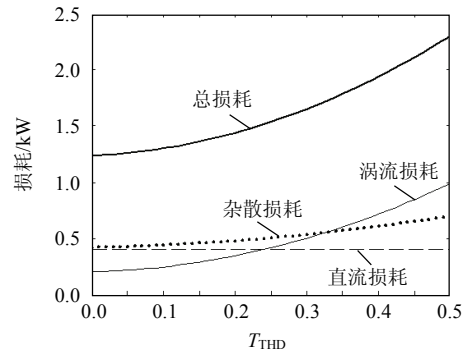


图 6 各类损耗与 THD 之间的关系
Fig. 6 Different losses versus THD

本文提出的修正系数损耗算法,同时考虑到不同频率谐波下绕组的等效非线性参数和谐波损耗叠加计算,计算复杂程度与 IEEE 标准算法相当,精度比传统曲线拟合和 IEEE 标准方法相对提高,结果更接近实际情况。

4 结论

1) 本文方法从磁场或涡流在导体中分布的角度分析谐波电流在导体中传播的频变效应问题,即导体内磁场及涡流并非均匀分布。

2) 本文方法通过对频变指数的修正,考虑到不同频率谐波下绕组的等效非线性参数和谐波损耗叠加计算,进而避免 K 、 F 系数计算造成的保守性,并使计算结果更加合理。

参考文献

- [1] 常炳双, 辛健. 配电变压器经济运行模式的探讨[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 247-248.
Chang Bingshuang, Xin Jian. Discussion about economical operation mode of distribution transformer[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 247-248(in Chinese).
- [2] 李斌勤, 陈伟根, 李刚. 谐波对电网中有功计量装置的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 154-159.
Li Binqin, Chen Weigen, Li Gang. Analysis on affects of harmonics on active energy metering devices[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 154-159(in Chinese).
- [3] 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): 33-36.
Liu Chengjun, Yang Rengang. Calculation and analysis of transformer's Harmonic Loss[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 33-36(in Chinese).
- [4] Themistoklis D K, Antonios G K. Harmonic Impact on distribution transformer no-load loss[J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 2010, 57(1): 193-200.
- [5] 郭满生, 梅桂华, 张喜乐, 等. 直流偏磁条件下单相三柱电力变压器的损耗计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 67-71.
Guo Mansheng, Mei Guihua, Zhang Xile, et al. Calculation of losses in single phase three limb transformer under DC-biasing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 67-71(in Chinese).

- [6] Makram E B, 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 System, 1988, 3(4): 1857-1863.
- [7] ANSI/IEEE Standard C57.110—2008 IEEE recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents[S].
- [8] 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, 15(4): 1331-1333.
- [9] 吴笃贵, 徐政. 三相多芯柱电力变压器的谐波模型研究[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 15-20.
Wu Dugui, Xu Zheng. A research on harmonic model of three-phase multi-legged transformer[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 15-20(in Chinese).
- [10] ANSI/IEEE standard C57.110—1986 IEEE recommended practice for establishing transformer capability when supplying non-sinusoidal load currents[S].
- [11] Tao Shun, Xiao Xiangning. Comparing transformer derating computed using the harmonic loss factor FHL and K -Factor[C]// Proceedings of the third international conference on deregulation and restructuring and power technologies. Nanjing, China: IEEE, 2008, 3: 1631-1634.
- [12] Deniz Y, Ewald F F. Measured transformer derating and comparison with harmonic loss factor (F_{HL}) approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 186-191.
- [13] 毛行奎, 陈为. 开关电源高频平面变压器并联 PCB 线圈交流损耗建模及分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 167-173.
Mao Xingkui, Chen Wei. AC loss modeling and analysis for parallel PCB winding in high-frequency power planar transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 167-173(in Chinese).
- [14] 杨利水, 杨旭, 徐岩. 电力变压器内部故障的非线性仿真模型[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 183-188.
Yang Lishui, Yang Xu, Xu Yan. A nonlinear model to calculate post-internal fault parameters of power transformer[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 183-188(in Chinese).
- [15] Sharifian M B B, Faiz J, Fakheri S A, et al. Derating of distribution transformers for non-sinusoidal load currents using finite element method[C]//Proceedings of the 2003 10th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems. Sharjah, United Arab Emirate: IEEE, 2003, 2: 754-757.
- [16] 邓淑娟, 罗隆福, 李勇, 等. 新型工业变流系统间谐波与次谐波特性分析[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 28-32.
Deng Shujuan, Luo Longfu, Li Yong, et al. Characteristic analysis on inter-harmonics and sub-harmonics in the new type of industry converting system[J]. Power System Technology, 2003, 25(7): 754-757(in Chinese).



蔡国伟

收稿日期: 2011-04-02。

作者简介:

蔡国伟(1968), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行分析方面的教学与科研工作,

E-mail: caigw@mail.nedu.edu.cn;

孔令国(1984), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网电能质量与变压器损耗分析, E-mail:

klgwin@126.com;

潘超(1981), 男, 博士研究生, 主要从事电磁场数值计算、电力系统电磁兼容方面的研究工作;

王建元(1971), 男, 博士, 主要从事电力电子技术和智能配电网方面的研究工作;

杨德友(1983), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定性分析及大规模可再生能源并网。

(责任编辑 褚晓杰)