

变压器谐波损耗计算及影响因素分析

张占龙¹, 王科^{1,2}, 李德文¹, 周军³, 吴喜红¹, 黄嵩¹, 唐炬¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆长寿供电局, 重庆 401220;
3. 四川自贡电业局, 四川 自贡 643000)

摘要: 为了准确分析配电网谐波对变压器损耗的影响, 依据电路理论建立了变压器谐波损耗模型, 推导出变压器谐波损耗的计算关系式。针对谐波次数和变压器负载不平衡引起的谐波损耗进行了分析, 提出了变压器谐波损耗在线监测方法, 并通过实验对该方法的有效性进行了分析。分析结果表明: 建立的变压器谐波损耗模型一方面由于不需要考虑变压器一次侧谐波电流, 简化了计算复杂程度; 另一方面能够准确计算出变压器的各次谐波引起的变压器损耗。基于配电网3次与5次谐波引起的变压器损耗占变压器总谐波损耗的90%以上, 有效降低配电网3次与5次谐波对于变压器的降损节能具有很好的工程实用价值。

关键词: 变压器; 谐波; 不平衡; 简化模型; 在线监测

Transformer harmonic loss calculation and influence factor analysis

ZHANG Zhan-long¹, WANG Ke^{1,2}, LI De-wen¹, ZHOU Jun³, WU Xi-hong¹, HUANG Song¹, TANG Ju¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Chongqing Changshou Power Supply Bureau, Chongqing 401220, China; 3. Sichuan Zigong Electric Power Bureau, Zigong 643000, China)

Abstract: In order to analyze the influence of distribution network harmonic on transformer loss accurately, transformer harmonic loss model is established according to circuit theory and its calculation formula is derived. Transformer harmonic loss caused by harmonic order and transformer load imbalance is analyzed, a method about online monitoring transformer harmonic loss is proposed, and its effectiveness is analyzed by experiment. The result confirms that the calculation can be simplified by using transformer harmonic loss model because it does not need to consider the transformer primary side harmonic currents and transformer harmonics loss caused by each order harmonic can be calculated accurately. Effectively reducing third order and fifth order harmonic of distribution network has a good practical value for energy conservation of transformer because more than 90% of transformer harmonic loss is caused by them.

This work is supported by special fund of the National Basic Research Program of China (973) (No. 2009CB724506).

Key words: transformer; harmonic; unbalance; simplified model; online monitoring

中图分类号: TM406 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0068-05

0 引言

降损节能是智能电网发展方向之一, 变压器作为电力系统中重要的输配电设备, 其工作效率直接关系到电网电能转换的效率, 也是用户能否正常使用电能的重要组成部分^[1]。随着电网中负载的复杂

多样性, 电网中存在的谐波和负荷不平衡已经是一种比较普遍的现象^[2], 长期运行增加了变压器内部损耗, 造成较大的电能损耗, 缩短变压器寿命, 严重时将对电网的安全、经济运行造成极大的影响。

在变压器谐波损耗监测中, 文献[3]提出了变压器谐波损耗的计算方法, 分析了变压器谐波损耗与谐波电流畸变率的关系。文献[4]提出了考虑集肤效应时的变压器谐波损耗计算方法。文献[5]分析了谐波次数与变压器模型参数之间的曲线关系。上述研究成果集中在变压器谐波损耗的理论分析和谐波状

基金项目: 国家重点基础研究计划(973)资助(2009CB724506); 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室访问学者基金(2007DA10512709408)、中国电机工程学会电力青年科技创新项目

态下的变压器参数变化, 没有考虑变压器负载不平衡和谐波次数对变压器谐波损耗的影响。本文在文献[3]提出的变压器谐波损耗模型的基础上进行了改进, 简化了变压器谐波损耗计算复杂程度, 并分析了谐波次数和三相负载不平衡与变压器谐波损耗之间的关系。

1 变压器谐波损耗模型

根据变压器开路试验和短路试验对变压器的等效电路参数进行计算, 然后根据集肤效应和叠加原理, 得出变压器谐波等效模型—变压器 T 形等效电路如图 1 所示。

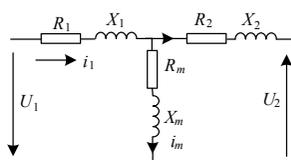


图 1 变压器 T 形等效电路

Fig.1 T equivalent circuit of transformer

图 1 中的等效电路参数励磁电阻 R_m 和励磁电抗 X_m 通过变压器开路试验计算而得; 原端电阻 R_1 、副端电阻 R_2 、原端电抗 X_1 和副端电抗 X_2 由短路试验计算而得。

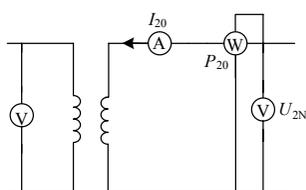


图 2 变压器开路试验原理图

Fig.2 Open-circuit test diagram of transformer

开路试验原理如图 2 所示, 试验时变压器二次侧开路, 工程上为了试验时的安全和仪表选择的方便, 开路试验通常在低压侧加压, 高压侧开路, 此时测出的值为归算到二次侧的值, 需要将其再归算到高压侧, 其归算计算公式为:

$$|Z_m| = k^2 |Z_{m(\text{低压})}| = k^2 \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}I_{20}} \quad (1)$$

$$R_m = k^2 R_{m(\text{低压})} = k^2 \frac{P_{20}}{3I_{20}^2} \quad (2)$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} \quad (3)$$

短路试验原理如图 3 所示, 试验时把二次侧绕组短路, 一次侧加电压 U_k , 输入功率 P_k 、电流 I_k , 由于短路试验所加电压很小, 短路试验时变压器内部的磁通小, 激磁电流和铁耗可以忽略不计, 由此可求出变压器的短路阻抗 Z_k , 如式 (4) 所示。

$$|Z_k| = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} = \frac{U_{1k}}{I_{1N}} \quad (4)$$

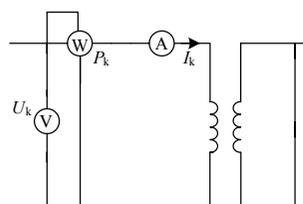


图 3 变压器短路试验原理图

Fig.3 Short-circuit test diagram of transformer

不计铁耗时, 短路输入功率可以认为全部消耗在一次和二次绕组的电阻上, R_k 的计算如式 (5) 所示, X_k 的计算如式 (6) 所示。在工程中大多采用一次侧电阻 R_1 与二次侧 R_2 相等的计算方法将二者分离, 所以变压器等效参数中的 $R_1=R_2=R_k/2$, $X_1=X_2=X_k/2$ [6]。

$$R_k = \frac{P_{1k}}{I_{1k}^2} = \frac{P_{1k}}{I_{1N}^2} \quad (5)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (6)$$

当谐波作用于变压器时, 由于集肤效应的影响, 其内部参数会发生很大的变化。在图 1 所示的变压器等效模型基础上, 利用叠加原理将各次谐波分量看成是一系列独立电流源, 分别叠加在变压器上, 构成变压器的谐波等效模型, 对于第 n 次谐波, 变压器谐波等效模型如图 4 所示。

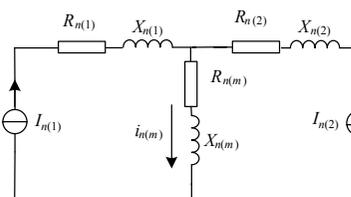


图 4 变压器谐波等效模型

Fig.4 Transformer harmonic equivalent model

图 4 中 n 为谐波次数, $I_{n(1)}$ 为变压器一次侧所加的谐波电流, $I_{n(2)}$ 为变压器二次侧的谐波电流。 $R_{n(1)}$ 、 $X_{n(1)}$ 为第 n 次谐波作用下变压器一次侧绕

组的电阻和电抗。 $R_{n(2)}$ 、 $X_{n(2)}$ 为第 n 次谐波作用下变压器二次侧绕组的电阻和电抗。 $R_{n(m)}$ 、 $X_{n(m)}$ 为第 n 次谐波作用下变压器的激磁阻抗和激磁电抗。

为了便于计算和测量,将一次侧电阻、电抗、激磁电阻和激磁阻抗归算到二次侧,这样在计算变压器谐波损耗时只需要测量其二次侧谐波电流,很大程度上简化了变压器谐波损耗计算的复杂性,变压器 n 次谐波等效模型如图 5 所示,其中 $r_{n(1)}$ 、 $x_{n(1)}$ 为变压器一次侧归算到二次侧的谐波电阻和电抗, $r_{n(m)}$ 、 $x_{n(m)}$ 为变压器一次侧归算到二次侧的激磁电阻和激磁电抗。

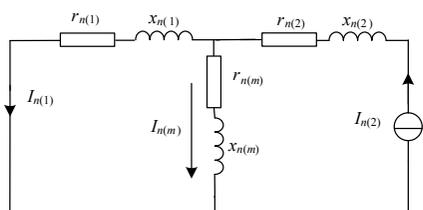


图 5 简化的变压器谐波等效模型

Fig.5 Simplified transformer harmonic equivalent model

以变压器的基波等效模型参数值为基准,根据集肤效应原理,可以得到各次谐波损耗模型的参数值。导体每个单位长度的电阻和电感计算公式如下:

$$R = \frac{1}{2\pi b \sigma \delta_c}; \quad L = \frac{1}{2\omega \pi b \sigma \delta_c}; \quad \delta_c = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (7)$$

式(7)中: b 为导体半径,mm; σ 为电导率,铜为 5.8×10^7 s/m; δ_c 为集肤深度,mm; ω 为工作频率,Hz; μ 为导体的绝对磁导率。

由式(7)可知,导体的工作频率越高,其阻抗就越高。以 50 Hz 时的电阻和电抗为基准,各次谐波电阻值为基准值的 \sqrt{n} 倍,各次谐波电抗近似为基波值^[7-8],因此第 n 次谐波产生的变压器损耗计算关系式如式(8):

$$P_n = 3I_{n(1)}^2 r_{n(1)} + 3I_{n(2)}^2 r_{n(2)} + 3I_{n(m)}^2 r_{n(m)} \quad (8)$$

变压器谐波总损耗计算关系式如式(9):

$$P_{\text{总}} = 3 \sum_{n=2}^{\infty} I_{n(1)}^2 r_{n(1)} + 3I_{n(2)}^2 r_{n(2)} + 3I_{n(m)}^2 r_{n(m)} \quad (9)$$

2 变压器谐波损耗影响因素分析

依据变压器谐波等效模型,影响变压器谐波损耗主要有两个因素:谐波次数和负载不平衡。为了有效计算与分析,选取的变压器为 $Y, y_n 0$ 连接方

式,额定容量 $S_N = 30$ kVA,一次侧和二次侧的额定电压比 $U_{1N}/U_{2N} = 10/0.4$ kV,额定频率 50 Hz。

通过变压器空载试验和短路试验原理,计算出变压器谐波模型参数,如表 1 所示,其中 n 为谐波次数^[9]。

表 1 变压器谐波损耗模型参数值

Tab.1 Parameter values of transformer harmonic loss model

$x_{n(1)}/\Omega$	$x_{n(2)}/\Omega$	$x_{n(m)}/\Omega$
0.098	0.098	304.3
$r_{n(1)}/\Omega$	$r_{n(2)}/\Omega$	$r_{n(m)}/\Omega$
$0.040\sqrt{n}$	$0.048\sqrt{n}$	$69.4\sqrt{n}$

在变压器三相负载平衡且功率一定时,通过改变变压器各次谐波含有率,进而改变变压器谐波电流,计算出谐波次数与变压器谐波损耗之间的变化关系,如图 6 所示。

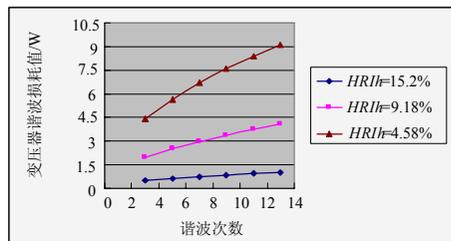


图 6 谐波次数与谐波损耗关系

Fig.6 Correlation between harmonic order and harmonic loss

由图 6 可知,在谐波含有率相同的情况下,谐波次数越高,变压器谐波损耗值有不同程度的增加,当谐波含有率为 4.58%,各次谐波损耗的差异较小。以 3 次谐波为基准,当谐波含有率为 9.18%和 15.2%时,变压器各次谐波损耗增加率最高时分别可达 93%和 105%。

当变压器负载总功率不变,对谐波电流含有率(HRIh)为 4.58%、9.18%和 15.2%的三种情况进行了变压器在单相运行、两相运行以及三相运行时的谐波损耗变化分析,如图 7 所示。变压器三相负载不平衡加剧了变压器谐波损耗,当 HRIh 为 15.2%时,变压器不平衡运行造成的谐波损耗增加率最高可达 89%。

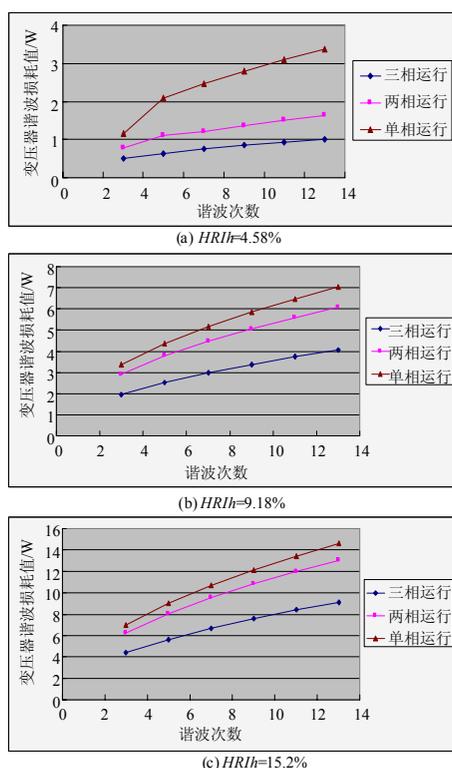


图7 三相负载不平衡与变压器谐波损耗关系

Fig.7 Correlation between three-phase load imbalance and transformer harmonic loss

3 实验与数据分析

为了验证变压器谐波损耗在线监测方法以及影响因素分析结果的正确性和可行性,我们在甘肃兰州变压器厂进行了变压器谐波损耗在线检测与分析实验。选取变压器容量为 5 kVA,变比为 1:1, $U_{1N}/U_{2N} = 380/380$ V, 变压器谐波损耗在线检测与分析实验接线如图 8 所示^[10]。

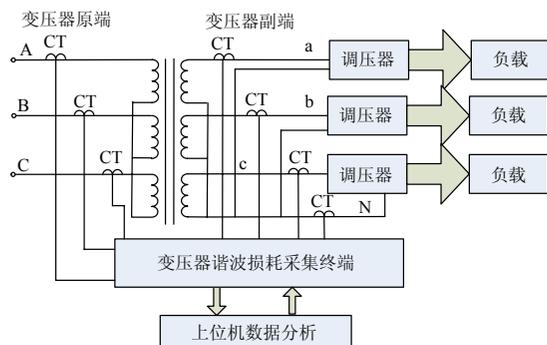


图8 实验室变压器谐波损耗检测示意图

Fig.8 Schematic diagram of laboratory testing transformer harmonic loss

变压器谐波损耗分析软件根据变压器的铭牌数据和变压器电路模型理论,建立其空载试验模型和负载试验模型,进而计算出变压器谐波参数。实验变压器的谐波损耗模型参数如表 2, n 为谐波次数。

表2 变压器谐波损耗模型参数值

Tab.2 Parameter values of transformer harmonic loss model

$x_{n(1)}/\Omega$	$x_{n(2)}/\Omega$	$x_{n(m)}/\Omega$
0.203	0.203	242.5
$r_{n(1)}/\Omega$	$r_{n(2)}/\Omega$	$r_{n(m)}/\Omega$
$0.463\sqrt{n}$	$0.463\sqrt{n}$	$1925.9\sqrt{n}$

实验时,变压器原端 A、B、C 和副端 a、b、c、N 分别接上钳式电流互感器,利用变压器谐波损耗采集终端测量变压器负载为线性负载和非线性负载时的变压器谐波损耗值,并对变压器谐波损耗传统模型和简化模型的计算结果进行比较,如表 3 所示。可以看出变压器在不同负载率的情况下,传统模型和简化模型的误差范围在 8%以内,证明本文提出的简化模型是可行的。

表3 传统模型与简化模型测量误差比较

Tab.3 Comparison of error analysis between traditional model and simplified model

变压器负载率	变压器总谐波损耗/W		误差
	传统模型	简化模型	
75.2%	54.26	51.65	4.8%
59.4%	20.53	19.76	3.9%
46.2%	11.65	10.87	6.9%
30.3%	2.53	2.31	8.0%

在分析变压器三相不平衡运行时的谐波损耗实验中,只是重新分配变压器副端 a, b, c 三相的负载大小,整个变压器负载的功率和负载类型并没有改变,其计算结果如图 9、10 所示。

从图 9 可以看出线性负载引起的谐波损耗很小,可以忽略不计。变压器谐波损耗主要是由非线性负载引起,从图 10 (a) 可以看出负载率为 75.2% 与 30.3% 时,3 次和 5 次谐波损耗值分别增加了 80 倍和 25 倍,其他各次谐波损耗稍有增加,从图 10 (b) 和图 10 (c) 可以看出变压器三相不平衡增加了变压器谐波损耗,其中图 10 (c) 中不平衡运行引起 3 次和 5 次谐波损耗的增加率分别为 33% 和 65%。

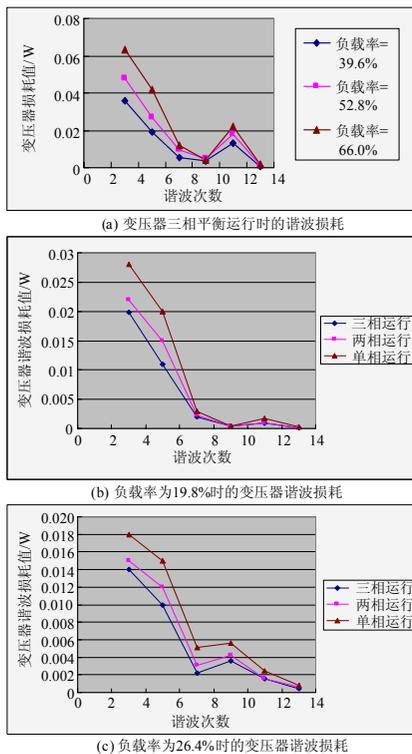


图9 线性负载下的变压器谐波损耗分析

Fig.9 Transformer harmonic loss analysis in the conditions of line load

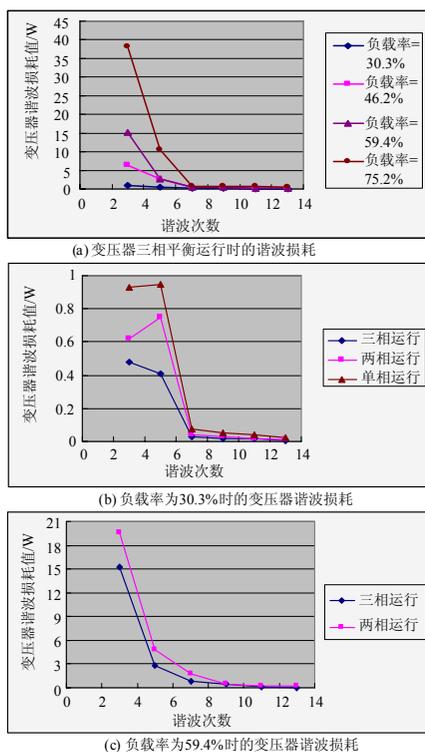


图10 非线性负载下的变压器谐波损耗分析

Fig.10 Transformer harmonic loss analysis in the conditions of nonlined load

4 结语

本文提出了基于变压器谐波损耗简化模型的在线监测方法, 分析了三相不平衡和谐波次数对变压器谐波损耗的影响, 实验结果一方面验证了该模型的正确性, 表明采用该方法可以更加简便、及时地监测变压器谐波损耗, 对于降低变压器损耗、判断其运行状态提供了数据参考, 另一方面表明要降低变压器的谐波损耗还需要做好以下几项工作:

- 1) 有效治理电网中3次和5次谐波。
- 2) 对变压器进行三相不平衡无功补偿。
- 3) 合理设计非线性负载的电气参数, 避免设备对电网造成谐波。

参考文献

[1] 熊浩, 孙才新, 张昀, 等. 电力变压器运行状态的灰色层次评估模型[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 55-60. XIONG Hao, SUN Cai-xin, ZHANG Yun, et al. A hierarchical grey evaluation model for operation condition of power transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 55-60.

[2] 梁志瑞, 叶慧强, 赵飞. 电力系统谐波状态估计研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 157-160. LIANG Zhi-ru, YE Hui-qiang, ZHAO Fei. Overview on power system harmonic state estimation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 157-160.

[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, 42. LIU Cheng-jun, YANG Ren-gang. Calculation and analysis of transformer's harmonic loss[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 33-36, 42.

[4] 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 of harmonic and how to reducing it for energy-saving[J]. Electrical Technology, 2009 (2): 15-19.

[5] 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 Transactions on Power Systems, 1988, 3(4): 1857-1863.

[6] 周顺荣. 电机学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[7] Wakilen G J. 电力系统谐波基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[8] Thompson R L, Elham B, et al. A laboratory experiment for transformer modeling in the presence of harmonic Ddistortion[C]. //System Theory, Proceedings of the Twentieth Southeastern Symposium. 1988, 3: 475-479.

(下转第 78 页 continued on page 78)

in power system modeling and computation[C]. // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 1992: 754 - 760.

[11] Wang Zi-an, Alvarado Fernando L. Interval arithmetic in power flow analysis[C]. // IEEE Power Engineering Soc. IEEE Transactions on Power Systems. Baltimore(United States): 1992: 1341-1349.

[12] Miranda V, Saraiva J T. Fuzzy modelling of power system optimal load flow[C]. // IEEE Power Engineering Soc, IEEE Transactions on Power Systems. Baltimore, United States: 1991: 843-849.

[13] 王平洋. 配电系统规划中的若干重要问题[J]. 电网技术, 2001, 25 (5) : 1-5.
WANG Ping-yang. Some important problems in distribution planning[J]. Power System Technology, 2001, 25 (5) : 1-5.

[14] 张焰, 陈章潮. 电网规划中的模糊潮流计算[J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (3) : 20-22.
ZHANG Yan, CHEN Zhang-chao. The calculation of fuzzy load flow in electric power planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22 (3) : 20-22.

[15] 朱海峰, 程浩忠, 张焰, 等. 利用盲数进行电网规划的潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 74-78.
ZHU Hai-feng, CHENG Hao-zhong, ZHANG Yan, et al. Power flow analysis of electric power networks flexible planning by means of unascertained number[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (8) : 74-78.

[16] 李如琦, 谢林峰, 王宗耀, 等. 基于节点分层的配网潮流前推回代方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 63-66.
LI Ru-qi, XIE Lin-feng, WANG Zong-yao, et al. Back/forward substitution method for radial distribution load flow based on node-layer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 63-66.

[17] 钱锋, 陈星莺. 10 kV配电网规划研究[D]. 南京: 河海大学, 2003
QIAN Feng, CHEN Xing-ying. Study of 10 kV distribution network planning[D]. Nanjing: Hohai University, 2003.

[18] 杨建军, 战红, 陈宪国. 基于遗传算法并避免不可行解的配电网重构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 43-46.
YANG Jian-jun, ZHAN Hong, CHEN Xian-guo. Optimization of distribution network reconfiguration of avoiding infeasible solutions based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(17): 43-46.

[19] 王秀云, 任志强, 楚冬青. 用于降低网损的配电网优化重构方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 21-24.
WANG Xiu-yun, REN Zhi-qiang, CHU Dong-qing. Study of algorithm on distribution network optimum reconfiguration for reducing line loss[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 21-24.

收稿日期: 2010-02-27; 修回日期: 2010-05-24

作者简介:

张亚璇 (1983-), 女, 硕士研究生, 从事配电网规划研究; E-mail: yaxuan5142@163.com

严萃群 (1974-), 男, 本科, 工程师, 从事农村电网生产技术管理工作;

唐巍 (1971-), 女, 教授, 从事电力系统分析、配电网规划、配电网经济运行方面的研究。

(上接第 72 页 continued from page 72)

[9] 吴天明, 赵新力, 刘建存. MATLAB 电力系统设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

[10] 郝治国, 赵学文, 张保会. 变电站变压器经济运行实时监控[J]. 继电器, 2002, 30(1): 18-21.
HAO Zhi-guo, ZHAO Xue-wen, ZHANG Bao-hui. Resarch on real-time SCADA system for economic operation of transformers in substations[J]. Relay, 2002, 30(1): 18-21.

收稿日期: 2010-03-02; 修回日期: 2010-11-29

作者简介:

张占龙 (1971-), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电磁兼容与故障检测、数字仪器设备、计算机测量与控制; E-mail: zhangzl@cqu.edu.cn

王科 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备故障检测。