

基于磁链平衡方程的变压器保护的关键问题的研究

张志强¹, 哈恒旭², 谭雨珍²

(1.德州供电公司, 山东 德州 253000; 2.山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要: 变压器是电力系统中的枢纽关节, 是电力系统的重要组成部分。在查阅大量参考文献的基础上, 分析了变压器保护的现状, 并在基于变压器模型的变压器保护原理基础上, 提出一种基于变压器磁链平衡方程的变压器保护原理, 并分析了其理论可靠性。该原理采用带有遗忘因子的最小二乘法实现变压器绕组参数估计, 提高了参数估计收敛的快速性。另外, 该原理应用基于投影变换理论的微分算子变换方法克服差分变换引起的误差。通过初步的理论分析, 该保护方案通过准确、快速的实现变压器绕组参数的辨识估计, 以及基于投影变换理论的微分算子变换, 能够准确地确定保护的整定值 K_{zd} 。

关键词: 变压器保护; 磁链平衡方程; 遗忘因子; 最小二乘法; 投影变换

Study on the key issues of transformer protection based on magnetism-chain balance equation

ZHANG Zhi-qiang¹, HA Heng-xu², TAN Yu-zhen²

(1.Dezhou Power Supply Company, Dezhou 253000, China;

2.Department of Electrical and Electronics Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Transformer is the hinge joint of power system, which is also the important part of power system. Based on many references, this paper analyzes the actuality of transformer protection. According to the transformer model-based transformer protection principle, this paper brings forward a novel principle, which is based on the magnetism chain balance equation, and discusses the feasibility theoretically. The principle applies the recursive least-squares theory with oblivious factor to estimate transformer parameter. So the rate of estimate constringency will be enhanced. In addition, the principle uses differential coefficients transform method based on projection transform to overcome the errors which are caused by difference transform. Through primary analysis theoretically, this protection scheme can confirm the acting value of protection K_{zd} exactly via distinguishing the parameter of transformer accurately and fleetly and realize the differential coefficient transforming based on projection transform.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50707002) and Shandong Educational Department Foundation (No.J06B06).

Key words: protection of transformer; magnetism chain balance equation; oblivious factor; least squares; projection transform

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)14-0001-05

0 引言

电力变压器在电能传输中起着枢纽作用, 其故障会对电力系统供电可靠性和系统运行稳定性带来严重影响。现代电力系统的发展要求提高电力设备的安全运行水平, 不仅要求继电保护装置快速切除故障元件, 还要求提高电力系统继电保护装置具有较高的可靠性和灵敏度。

目前在工程的实际应用中, 变压器电气量主保护一般采用电流纵联差动保护。纵差保护接线容易、原理简单, 在工程上具有广阔的应用范围。由于变

压器是电磁耦合的电气元件, 纵差保护由于受励磁涌流的影响, 其动作的正确率一直不高。长久以来, 正确识别励磁涌流和故障电流一直都是变压器纵差保护的研究重点。识别涌流的方法目前主要可以分为谐波识别方法、波形识别方法、磁通特性原理、等值电路原理、智能理论识别法等等^[1,2]。以上的各种方法由于各种原因均无法完全地识别励磁涌流。因此, 变压器保护的发展趋势应该是研究新型的保护原理和保护方案。文献[3~5]提出的利用励磁特性曲线和利用磁通和差流相对变化曲线判别故障类型。这种方法不但可以克服二次谐波原理的不足, 而且适宜用微机实现。但是磁通特性保护原理目前仅适用于单相变压器组。文献[6]提出的基于序阻抗原理的变压器保护方案, 利用变压器发生区内外故

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50707002); 山东省教育厅科技计划项目资助(J06B06)

障时, 变压器两侧正负序阻抗所在象限的不同, 能够有效识别变压器区内外故障, 具有不受CT饱和以及CT变化不一致影响等优点。文献[7]改进了象平区域的划分, 补充了励磁涌流的识别判据。但是, 由于序阻抗原理仍然克服不了励磁涌流带来的影响, 其保护的動作可靠性不高。文献[8]说明了功率差动保护原理。在正常运行时变压器消耗的有功非常小, 而变压器绝缘损坏时, 电弧放电发热将消耗大量的有功, 通过检测变压器消耗有功的大小, 可以判别变压器是否发生内部故障。该方法基于能量守恒定律, 可以较真实反映变压器的实际运行状况。由于在功率差动保护原理中, 没有让励磁涌流作为动作的因素, 因此不受励磁涌流的影响。其缺点是要避开涌流时第1周期的充电过程, 并且涌流时铜耗难以精确计算。对于Y/Δ接线的变压器, 由于Δ侧绕组内部电流无法获取, 导致铜损耗无法确定。

文献[9~12]提出了一种新型的、基于变压器模型的变压器保护原理, 该原理从根本上消除了励磁涌流的影响, 并且通过动模实验, 验证了该原理的正确性。但是在实际的应用中, 该原理受差分误差、辨识参数“数据饱和”的影响。文献[13]对基于变压器模型的保护原理的误差进行了分析, 研究发现影响动作整定值的原因有: 各绕组的漏电抗和电阻取近似值; 用差分代替微分造成的误差。本文在该原理的基础上, 提出一种以带时间遗忘因子的递推最小二乘估计算法和微分算子的投影变换为基础的, 基于变压器磁链平衡方程的变压器保护原理。

1 基于磁链平衡方程变压器保护原理

1.1 基于磁链平衡方程变压器保护原理

图1为单相双绕组变压器模型。

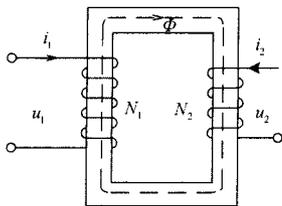


图1 单相双绕组变压器模型

Fig.1 Model of single-phase transformer

由图1可以得到:

$$\begin{cases} u_1 = i_1 R_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\Phi_m}{dt} \\ u_2 = i_2 R_2 + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\Phi_m}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中的 $d\Phi_m/dt$ 项包含了B-H曲线的非线性关

系, 很难直接获得, 通过高斯消去, 抵消掉 $d\Phi_m/dt$, 并设 $k = N_1/N_2$ 整理式(1)为

$$u_1 - ku_2 - (i_1 R_1 - ki_2 R_2) - \left(L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} - kL_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} \right) = 0 \quad (2)$$

在变压器正常运行或是发生区外故障时, 公式(2)的右端为0; 而当变压器内部发生故障或是发生区内故障时, 由于两端的电流电压发生变化, 从而导致公式(2)的右端不再为零。

1.2 保护方案的确定

通过以上的原理分析, 可以设定整定值 K_{zd} :

$$K_{zd} = (u_1 - ku_2) - (i_1 R_1 - ki_2 R_2) - \left(L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} - kL_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} \right) \quad (3)$$

在理论上, 在变压器正常运行或是发生区外故障时, $K_{zd} = 0$; 当变压器发生内部故障或是区内故障时, $K_{zd} \neq 0$ 。这样, 通过判断 K_{zd} 的值就可以判断变压器是否运行正常。

对于三相变压器, Y/Y接线的磁链平衡方程可以按照单相变压器的方式推导出; 而对于Y/Δ接线, 由于Δ侧的绕组电流不能够测量, 因此需要对Δ侧的线电流经过变换, 得出绕组电流。由于篇幅所限, 在此不一一进行推导。文献[10~12]对此均做了详细的推导。

2 变压器绕组参数估计

通过上述分析, 该原理的关键技术之一就是要求能够得到准确的变压器等值电阻和漏感抗参数。由于变压器内部构造的复杂性, 只能通过试验和铭牌参数的计算得到相关参数, 其准确度不高。因此, 较好的方法就是对变压器的等值电阻和漏感抗进行辨识估计。

系统辨识技术对于电力系统分析是一种行之有效的工具。其中包括最小二乘估计、卡尔曼滤波等技术方法。对于电力系统参数的辨识, 人们通常采用最小二乘的估计方法。文献[9~12]采用递推最小二乘算法RLS (Recursive Least Squares), 克服了非递推最小二乘估计中反复求逆、计算量大的缺点。由于电力系统的故障信号具有一定的暂态特性, 采用递推最小二乘算法对参数进行辨识, 辨识时间长。同时为了解决最小二乘算法中的数据饱和问题^[14], 以加快辨识算法的收敛性, 更快地得到稳定的参数辨识结果, 本文使用带有时间遗忘因子的递推最小二乘算法对变压器参数进行估计。

2.1 带时间遗忘因子的递推最小二乘算法

单相双绕组变压器的磁链平衡方程可以表示

为:

$$u_1 - ku_2 = R_1 i_1 - kR_2 i_2 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} - kL_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} \quad (4)$$

写成矩阵形式:

$$\Delta U = A^T \theta + \varepsilon \quad (5)$$

其中

$$\Delta U = \begin{bmatrix} u_1 - ku_2 \\ \vdots \\ u_{1n} - ku_{2n} \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}; \quad \theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix}$$

$$\theta_i = [R_{i1} \quad R_{i2} \quad L_{\sigma i1} \quad L_{\sigma i2}];$$

$$a_i = \left[i_{i1} \quad -ki_{i2} \quad \frac{di_{i1}}{dt} \quad -k \frac{di_{i2}}{dt} \right]$$

采用带有时间遗忘因子的递推最小二乘法对 θ 进行估计, 步骤如下:

$$\begin{cases} \theta(k+1) = \theta(k) + F(k) [\Delta U(k) - a^T(k)\theta(k)] \\ P(k) = \frac{1}{\lambda} [I - F(k)a^T(k)] P(k-1) \\ F(k+1) = P(k-1)a(k) [a^T(k)P(k-1)a(k) + \lambda]^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

其中: λ 为时间遗忘因子。

2.2 时间遗忘因子的确定

随着观测数据的增加, 普通的RLS算法参数估计误差较大。针对电力系统信号的暂态特性, 为了体现系统的时变性, 强调新近数据的作用, 在进行递推算法时加入时间遗忘因子 λ , $0 < \lambda \leq 1$ 。对于慢时变参数 θ , 应选取较大的 λ ; 而对于快时变参数, 应选取较小的 λ 。文献[16]选取的遗忘因子为 $\lambda = 0.997$ 。

由于变压器中存在饱和, 不同的磁滞曲线其饱和度和不同, 饱和电流大小也不同。因此, 不能统一地确定一个遗忘因子, 而应该根据不同的情况分别确定相对应的时间遗忘因子。同时, 由于电力系统的暂态特性, 在参数辨识过程中, 暂态过程中的遗忘因子应较小, 而稳态中的遗忘因子应接近于1。也就是说, 对于每一个待辨识的参数, 其遗忘因子应该是一组数据, 其特点是由一个较小的值逐渐趋向于1。

根据最小二乘估计算法的目标函数

$$J = [\Delta U(k) - A(k)\theta]^T [\Delta U(k) - A(k)\theta] \quad (7)$$

最小二乘算法就是求解使其在极小值时的参数 θ 。

$$\theta = [A^T(k)A(k)]^{-1} A^T(k)\Delta U(k)$$

加入时间遗忘因子之后:

$$\hat{\theta} = [A^T(k)\lambda A(k)]^{-1} A^T(k)\lambda \Delta U(k) \quad (8)$$

令加权最小二乘估计误差的方差为:

$$V_{\text{ar}} = E \left[(\theta - \hat{\theta})(\theta - \hat{\theta})^T \right] = (A^T \lambda A)^{-1} A^T \lambda V \lambda A (A^T \lambda A)^{-1} \quad (9)$$

只要求出使式(9)达到最小的 λ 即可。引入“矩阵型”许瓦兹不等式, 解不等式, 可以得到

$$\lambda = V^{-1} = (P^T P)^{-1} \quad (10)$$

其中: P 为 $n \times n$ 的可逆矩阵。

3 基于投影变换理论的微分变换方法

影响动作整定误差的另外一个原因是由于使用差分变换代替微分变换。在直角坐标系中, 微分变换方法是微分变换转换为差分变换。变换精度取决于差分步长 h 的选择。步长 h 太大, 差分的精度就会降低; 步长 h 太小, 差分运算的计算量会增加。因此选择合适的差分步长, 是决定传统微分变换计算精度的关键。该保护原理的另一项关键技术就是应用投影变换理论将微分运算转换为代数运算, 以提高计算精度。

3.1 基于投影变换理论的微分变换^[17]

根据正交投影变换和多元分辨分析理论可知, 任何函数 $f(t) \in L^2(R)$ 都可以用某个二进采样频率 $f_s = 2^N$ 下的采样-空间 V_N ($L^2(R)$ 的嵌套子空间) 来逼近:

$$f(t) \approx f_N(t) = \sum_k C_k^N \phi_{N,k}(t) \quad (11)$$

利用投影变换理论,

$$f'(t) = \sum_k G_k \psi(t-k) \quad (12)$$

其中: $\psi(t-k) = d\phi(t-k)/dt$;

$$G_n = \langle g(t), \phi(t-n) \rangle = \sum_k C_k h(n-k);$$

所以, $f'(t) = \sum_k C_k \sum_n h(n-k)\phi(t-n) =$

$$\sum_n \left(\sum_m C_{n-m} h(m) \right) \varphi(t-n) = \sum_m h(m) \sum_n C_{n-m} \varphi(t-n) \quad (13)$$

令 $z = n - m$,

$$\begin{aligned} f'(t) &= \sum_m h(m) \sum_z C_z \varphi(t - (z+m)) = \\ &= \sum_m h(m) \sum_z C_z \varphi[(t-m) - z] = \\ &= \sum_m h(m) f(t - mT_s) \end{aligned} \quad (14)$$

所以, 离散化以后, 得到:

$$f'(n) = \sum_k h(k) f(n-k) \quad (15)$$

推广到矩阵空间, 可以得到:

$$F'_n = HF \quad (16)$$

其中: H 矩阵, 为微分算子的正交投影变换矩阵。矩阵 H 中的元素为:

$$h_l = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t-l) \psi(t) dt$$

其中: $\phi(t)$ 为正交尺度函数, $\psi(t) = d\phi(t)/dt$,

为正交尺度函数的导函数。

3.2 应用正交投影变换实现微分变换

仿真的信号采用正弦波 $f(t) = \sin(t)$, 其微分函数 $f'(t) = \cos(t)$, 采样间隔取 $T_s = 1/2^5$ s, 我们用 Daubichies 正交投影逼近其微分函数

$$f'(n) \approx \frac{1}{T_s} \sum_k h_k f(n-k)$$

并跟其微分函数进行比较分析其相对误差。然后, 我们再利用传统的差分方法对微分进行逼近, 比较正交投影逼近和差分逼近的误差。

由此计算所得仿真波形及其与真实值的相对误差见图 2。观察得到结论: 除了波形末端的几点振荡外, 实线与空心圆线几乎重合, 误差的数量级达到了 10^{-10} 。波形末端振荡的原因是微分算子在投影变换过程中基函数时间窗的边缘效应所导致, 其振荡波形的持续时间与所选择的正交基函数的支撑域有关。

其次, 采用差分逼近原微分函数, 可将原微分逼近为:

$$\frac{d}{dt} f(t) \approx \frac{f(t) - f(t - T_s)}{T_s}$$

用差分进行微分逼近的波形参见图 3, 计算所得值与真实值之间的相对误差成正弦分布, 且最大

误差为 0.01。此误差远远大于投影逼近所得函数与原微分函数之间的误差值。

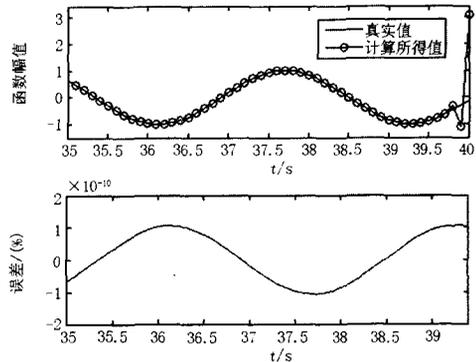


图 2 微分算子投影逼近仿真结果

Fig.2 Simulation results of approximation by projection method

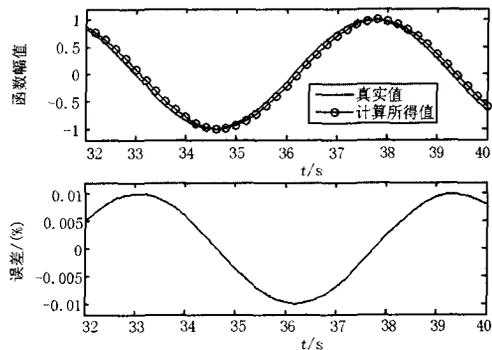


图 3 差分逼近仿真结果比较

Fig.3 Simulation result of approximation by difference method

正交投影变换理论与传统的差分方法相比, 不受差分步长的影响, 其优点是在计算的过程中无需卷积计算, 所有的运算都是代数运算, 而且运算矩阵在任何时刻都相同, 可以离线提前进行计算。另外, 基于投影变换的微分变换方法, 其计算量比较大, 其关键在于正交投影变换矩阵 H 是一个 $N \times N$ 阶矩阵, 虽然可以提前计算出, 但在进行电压、电流运算时仍然有较大的计算量, 然而 H 矩阵具有很大的稀疏性。可以预想, 正交投影矩阵 H 的对角化矩阵及其特征值必然有明显的特征。因此, 算法的计算量有望大量减少。

4 结论

基于变压器模型的变压器保护原理, 从根本上消除了励磁涌流的影响, 其原理也较为简单。本文在此基础上, 通过改进参数辨识方法和微分算子变换方法, 提出一种基于变压器磁链平衡方程的变压

器保护原理。该原理具有以下特点:

(1) 最小二乘算法可以满足实时估计变压器参数的要求,且收敛速度比较快,能够为保护算法提供可靠的依据。由于递推最小二乘估计误差的存在,使得变压器在发生小匝数故障时灵敏度不高。应用带时间遗忘因子的递推最小二乘算法实现变压器绕组参数估计。该方法较递推最小二乘算法,减少了暂态信息的影响,提高了收敛速度。多篇文献已经证明了该保护原理在基本理论上的正确性。

(2) 对于时间遗忘因子的选取,不再单一地选取经验值,而是采用根据信号衰减情况计算遗忘因子的方法。这样,能够根据不同的信号特点采取合适的遗忘特性,提高辨识的收敛速度。

(3) 基于投影变换理论的微分算子变换方法,克服了传统差分方法步长对计算结果的影响,利用投影变换理论,通过函数逼近原理,将微分算子的计算转换为代数计算。这种方法克服了通过差分变换由于差分步长所带来的误差。

参考文献

- [1] 王国兴,张传利,黄益庄. 变压器励磁涌流判别方法的现状及发展[J]. 中国电力,1998, 31(10): 19-22.
WANG Guo-xing, ZHANG Chuan-li, HUANG Yi-zhuang. The Present State and Development of the Method for Identifying Transformer Inrush Current[J]. Electric Power, 1998, 31(10): 19-22.
- [2] 张方军. 变压器励磁涌流与故障电流判别方法分析[J]. 广东电力, 2006, 19(6): 5-9.
ZHANG Fang-jun. Discriminating Method Analysis of Transformer Magnetizing In-rush Current and Fault Current[J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19(6): 5-9.
- [3] 王维俭 [译]. 变压器保护新技术: 考虑励磁特性的保护新技术[J]. (日)电气计算, 49(5).
- [4] Phadke A G, Trop J S. A New Computer-based Flux Restrained Current Differential Relay for Power Transformer Protection[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1983, 102(11): 3624-3629.
- [5] 徐岩,王增平,杨奇迹,等. 基于磁通特性的改进型变压器保护方案[J]. 继电器, 2003, 31(9): 9-14.
XU Yan, WANG Zeng-ping, YANG Qi-xun, et al. Study on the Improved Transformer Protection Method Based on Magnetic Flux Characteristics[J]. Relay, 2003, 31(9): 9-14.
- [6] Sidhu T S. A Power Transformer Protection Technique with Stability During Current Transformer Saturation and Ratio-mismatch Conditions[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 798-804.
- [7] 郑涛,刘万顺,庄恒建,等. 基于改进型序阻抗原理的变压器保护方案[J]. 电力系统自动化,2004, 28(14): 67-71.
ZHENG Tao, LIU Wan-shun, ZHUANG Heng-jian, et al. Study of a Transformer Protective Schemes Based on The Improved Sequence Impedance Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 67-71.
- [8] 孙鸣,梁俊滔,冯小英. 基于功率差动原理的变压器保护实现方法的分析[J]. 继电器, 2001, 29(12): 13-15.
SUN Ming, LIANG Jun-tao, FENG Xiao-ying. Analysis on the Implementation of Transformer Protection in Power Differential Protection Principle[J]. Relay, 2001, 29(12): 13-15.
- [9] 熊小伏,邓祥力,游波. 基于参数辨识的变压器微机保护[J]. 电力系统自动化,1999,23(1):18-21.
XIONG Xiao-fu, DENG Xiang-li, YOU Bo. Transformer Protection Using Parameter Identification Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999,23(1): 18-21.
- [10] 王增平,徐岩,王雪,等. 基于变压器模型的新型变压器保护原理的研究[J]. 中国电机工程学报,2003, 23(12): 54-58.
WANG Zeng-ping, XU Yan, WANG Xue, et al. Study on the Novel Transformer Protection Principle Based on the Transformer Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 54-58.
- [11] 褚云龙,郝治国,李朋. 基于变压器模型的变压器保护原理研究[J]. 继电器, 2006, 34(23): 1-5.
CHU Yun-long, HAO Zhi-guo, LI Peng. Study on the Large Transformer Protection Principle Based on the Winding Parameter Identification[J]. Relay, 2006, 34(23): 1-5.
- [12] 郝治国,张保会,褚云龙. 基于等值回路平衡方程的变压器保护原理[J]. 中国电机工程学报,2006, 26(10): 67-72.
HAO Zhi-guo, ZHANG Bao-hui, CHU Yun-long. Study on Transformer Protection Principle Based on Equivalent Circuit Equilibrium Equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 67-72.
- [13] 韩正庆,刘淑萍. 基于模型的变压器保护判据分析与改进[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(2).
HAN Zheng-qing, LIU Shu-ping. Analysis and Improvement of Transformer Protection Criterion Based on Model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(2).
- [14] DING F, CHEN T. Identification of Multivariable Systems Based on Finite Impulse Response Models with Flexible Orders[A]. in: Proceeding of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation Niagara Falls[C]. Piscataway: 2005.770-775.
- [15] 边肇祺,张学工. 模式识别[M]. 北京:清华大学出版社. 2004.
BIAN Zhao-qi, ZHANG Xue-gong. Mode Identification [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

(下转第9页 continued on page 9)

权重,一方面完全消除了不同量纲指标的不可公度性;另一方面充分体现了电能质量指标间相对优劣程度对电能质量综合属性的影响,实现按质赋权。

(2) 电能质量指标国内外大多取 95% 概率值作为衡量依据。因此,本文提出在考核周期内取电能质量实时综合指标的 95% 概率值作为衡量电能质量综合水平是合理的,并且很方便确定电能质量的等级,实现电能质量的综合评定。

参考文献

- [1] 贾清泉,宋家骅,兰华,等.电能质量及其模糊方法评价[J].电网技术,2000,24(6):46-49.
JIA Qing-quan,SONG Jia-hua,LAN Hua,et al.Power Quality and Fuzzy Method Evaluation[J].Power System Technology,2000,24(6): 46-49.
- [2] 唐会智,彭建春.基于模糊理论的电能质量综合量化研究[J].电网技术,2003, 27(12):85-88.
TANG Hui-zhi,PENG Jian-chun.Research on Synthetic and Quantificated Appraisal Index of Power Quality Based on Fuzzy Theory[J]. Power System Technology, 2003, 27(12):85-88.
- [3] 赵霞,赵成勇,贾秀芳,等.基于可变权重的电能质量模糊综合评价[J].电网技术,2005, 29(6):11-16.
ZHAO Xia,ZHAO Cheng-yong,JIA Xiu-fang,et al. Fuzzy Synthetic Evaluation of Power Quality Based on Changeable Weight[J]. Power System Technology, 2005, 29(6):11-16.
- [4] 李连结,姚建刚,龙立波,等.组合赋权法在电能质量模糊综合评估中的应用[J].电力系统自动化,2007, 31(4):56-60.

- LI Lian-jie,YAO Jian-gang,LONG Li-bo,et al. Application of Combination Weighing Method in Fuzzy Synthetic Evaluation of Power Quality[J].Automation of Electric Power Systems,2007, 31(4):56-60.
- [5] 姜辉,彭建春,欧亚平,等.基于概率统计和矢量代数的电能质量归一量化与评价[J].湖南大学学报(自然科学版),2003,30(1):66-70.
JIANG Hui,PENG Jian-chun,OU Ya-ping,et al.Power Quality Unitary Quantification and Evaluation Based on Probabilty and Vector Algebra[J].Journal of Hunan University(Natural Science),2003,30(1): 66-70.
- [6] 陶顺,肖湘宁.电能质量单项指标和综合指标评估的研究[J].华北电力大学学报,2008,35(2):25-29.
TAO Shun,XIAO Xiang-ning.Individuation Indices and Global Indicator of Power Quality[J]. Journal of North China Electric Power University,2008, 35(2):25-29.
- [7] 白若玉,伦昕义.层次单排序的差异矩阵法[J].抚顺石油学院学报,2000, 20(2):82-84.
BAI Ruo-yu,LUN Xin-yi.Difference Matrix Mode of Level Simple Sequence[J].Journal of Fushun Petroleum Institute, 2000,20(2): 82-84.

收稿日期:2008-08-19; 修回日期:2008-09-20

作者简介:

刘兵(1979-),男,硕士研究生,研究方向为电能质量与控制;E-mail:dianqi3446@163.com

李群湛(1957-),男,教授,博士生导师,研究方向为牵引供电理论,系统可靠性技术和电能质量与控制;

董祥(1984-),女,硕士研究生,研究方向为电能质量与控制。

(上接第 5 页 continued from page 5)

- [16] 高晶,王建华,张保会,等.变压器漏电感参数在线辨识方法研究[J].西安交通大学学报,2008, 42(2):199-203.
GAO Jing, WANG Jian-hua, ZHANG Bao-hui, et al.. On-Line Identification Algorithm for Transformer Leakage Inductance[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42 (2): 199-203.
- [17] 哈恒旭,王婧,邹本国,等.基于正交投影变换的输电线路电磁暂态计算新方法[J].电力系统自动化,2007, 31 (8): 36-40.
HA Heng-xu, WANG Jing, ZOU Ben-guo, et al. Novel

Algorithm of Electromagnetic Transient Computation by Means of Orthogonal Projection Operators[J]. Automation of Electric Power Systems,2007, 31 (8): 36-40.

收稿日期:2008-08-22; 修回日期:2008-10-07

作者简介:

张志强(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护;E-mail: vicar1982@sina.com

哈恒旭(1972-),男,博士,副教授,主要研究方向为电力系统继电保护。