

低压配电网三相不平衡负载参数的辨识方法研究

张鹏¹, 罗建¹, 吉畅², 王俊杰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, 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044;
2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 为了解决现阶段计算低压配电网负荷上实际压降、三相负荷不平衡度时忽略三相负荷不平衡与中性线阻抗同时存在的实际情况所引起的求解结果不准确问题, 提出一种实时计算负荷实际大小及负荷侧虚拟中性点电压的方法, 以此辅助监测低压配电网安全。首先建立与低压配电网等值阻抗网络匹配的高阶微分方程模型, 再利用方程系数与等值阻抗参数之间的关系, 采用暂态数据辨识模型参数, 实时求取三相负荷等值阻抗, 中性线阻抗及虚拟中性点电压。仿真结果验证了该方法的有效性和准确性。

关键词: 低压配电网; 负荷等值电路; 三相负荷不平衡; 扰动信号; 参数辨识

Three-phase unbalanced load parameters identification of low voltage power utilization network

ZHANG Peng¹, LUO Jian¹, JI Chang², WANG Junjie¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China)

Abstract: In order to solve the inaccuracy problem in calculating the actual voltage drop and the degree of three-phase load unbalanced of low voltage electrical load when takes no consideration of three-phase unbalanced load and non-ignorable neutral line impedance, a new safety monitoring method is presented by real-time monitoring of real voltage drop across the load. The new method establishes a high order equation model matching the equivalent impedance gird of real load of low voltage distribution network, based on the relationship between equation parameters and equivalent impedance parameters, uses transient signal to identify the model parameters, and calculates load fluctuations in real-time, neutral line impedance and load virtual point voltage. Simulation results demonstrate the effectiveness and accuracy of the proposed method.

Key words: low voltage power utilization network; load equivalent network; three-phase unbalanced load; perturbation signal; parameter identification

中图分类号: TM614

文章编号: 1674-3415(2015)24-0090-06

0 引言

低压配电网由短输电线路网络及大量用户负荷组成, 其安全性一直受到广泛关注^[1]。国标 JGJ16、GB 50054、BG/T 15543 等规定三相运行时需保证三相负荷平均分配、中性线上阻抗为零。然而实际三相负荷往往是不平衡的^[2-4], 加之中性线阻抗的存在, 使得负荷侧虚拟中性点电压出现偏移、至少一相负荷端电压升高^[5-8]。对用户而言, 电器在非正常电压下运行容易烧毁; 其次, 三相负荷产生的不平衡电流由中性线传回系统侧, 中性线线路老化、中

性线接头接触不良的部位阻抗值异常增大时, 容易出现过热, 成为火灾隐患^[9]。

目前进行三相负荷不平衡度计算^[10]、电压保护等分析时主要采用公共连接点(PCC)处的三相电流、对地电压数据^[11-14]。但 PCC 点对地电压受到上级电压以及地电位的制约, 正常运行状态下为三相对称电压, 无法表示用户侧在上述情况下的实际压降(PCC 点与虚拟中性点的压差)^[15]; 且实时采集各用户负荷数据来计算负荷的不平衡度又难以实现, 因此在虚拟中性点电压存在的非故障状态下, 主要通过三相电流来实现低压用电网的安全监测, 其缺

点一是无法表征负荷上的真实压降及实际不平衡度, 二是无法对中性线阻抗及其变化进行监测。

针对现有方法存在的问题, 本文提出一种监测低压配电网不平衡负荷的方法: 利用扰动下的暂态数据与稳态时等值端口模型的关系, 辨识出三相负荷等值阻抗和中性线阻抗, 计算虚拟中性点电压。实验证明, 该方法在三相平衡系统与不平衡系统中均能准确求取各参数值, 为低压用电网的安全性检测提供了新方法。

1 三相四线制负荷等值模型参数求取

任何负荷最终都是以阻抗形式作用到电源端, 因此在特定条件下可以将其等值为恒定或者变化的阻抗。400 V 低压用电网络中负荷主要为照明设备及包括空调、电冰箱等在内的含电动机负荷的各种家用电器。照明负荷等值为 $R(t)$ 、 $L(t)$ 的阻抗形式, 在短时间内, 负荷内部电动机在惯性作用下转速保持不变, 因此将其整体同样用为 $R(t)$ 、 $L(t)$ 的串联表示。并考虑中性线阻抗存在的情况, 得到如图 1 所示的待求等值网络^[16-18]。

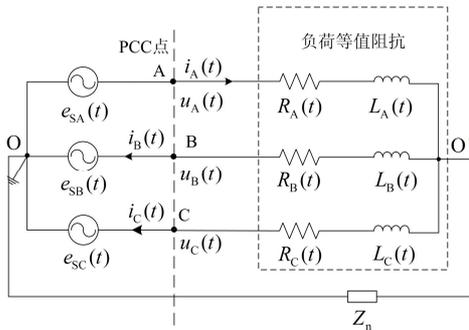


图 1 基本三相四线制电网等值电路图

Fig. 1 Basic three-phase four-wire grid equivalent circuit

通过辨识得到图 1 中三相等值阻抗 Z_A 、 Z_B 、 Z_C 及中性线阻抗 Z_n 或虚拟中性点电压后, 网络所有参数已知, 可实时得到三相不平衡度、负荷实际压降等具体数据。

然而需要辨识的参数共 7 个, 大于已知量(三相电压电流的采样值)个数, 无法直接求解。为此文献[19]提出利用多个稳态采样点构建微分方程求解各等值参数, 但是稳态时同一电气量相邻的各采样值线性相关, 方程所含信息量并未增加, 所得结果错误。

其次, 直接利用暂态信息辨识等值参数 R 、 L 时, 辨识结果有突变。这是由于实际负荷内部是由许多元件组成的高阶电路, 受到扰动时, PCC 处电流表现出高阶特性, 而图 1 网络是在稳态情况下等

值成为 1 阶电路, 无法拟合 PCC 处的电流电压特性。本文以高阶电路表示此时负荷内部各元件组合。需注意, PCC 处的电流电压特性在一次变化过程中一定, 则内部阶数一定, 因此总能找到一组适合的参数值, 使本文设定的元件组合与实际负荷形成的电流电压特性一致。将设定的元件组合阶数和模型阶数 K 增大, 即可增加精度。

为此本文首先建立一个与等值网络相对应的高阶微分方程模型, 以任意两相作为回路, 利用网络外部变化或者负荷内部自身变化引起的小扰动信号, 实时跟踪辨识各等值参数, 再根据所得参数求出虚拟中性点漂移电压, 以此表征用电网的安全度。

利用高阶微分方程表示任一回路的端口特征, 以 AB 回路为例得:

$$\begin{aligned} a_0 u_{AB}(t) + a_1 u_{AB}(t)' + a_2 u_{AB}(t)'' + a_3 u_{AB}(t)''' + \dots = \\ b_0 i_A(t) + b_1 i_A(t)' + b_2 i_A(t)'' + b_3 i_A(t)''' + \dots + \\ c_0 i_B(t) + c_1 i_B(t)' + c_2 i_B(t)'' + c_3 i_B(t)''' + \dots \end{aligned} \quad (1)$$

整理为

$$\sum_{k=0}^K a_k u_{AB}(t)^{(k)} = \sum_{k=0}^K b_k i_A(t)^{(k)} + \sum_{k=0}^K c_k i_B(t)^{(k)} \quad (2)$$

($k=0, 1, 2, \dots, k \dots K$), 式(2)为本文采用的辨识模型。其中:

1) $a_0, a_1 \dots a_k \dots a_K, b_0, b_1 \dots b_k \dots b_K, c_0, c_1 \dots c_k \dots c_K$ 为微分方程的待辨识系数。

2) K 称为等值阶数, 与系数 $a_k, b_k, c_k (k=0, \dots, K)$ 一起决定了系统的暂态特性。

对于任意结构的系统, 在一次暂态过程及暂态之后的稳态过程中, 辨识模型阶数及系数不变, 即所列写的高阶微分方程具有唯一性。 K 的选取与经验有关。

3) $u_A(t)$ 、 $u_B(t)$ 为电压信号的采样值;

$$u_{AB}(t) = u_A(t) - u_B(t);$$

$i_A(t)$ 、 $i_B(t)$ 为电流信号的采样值;

$u_{AB}(t)^{(k)}$ 、 $i_A(t)^{(k)}$ 、 $i_B(t)^{(k)}$ 为电压电流信号的各阶导数, 阶次为 $k (k=0, \dots, K)$ 。

本文采用直接时域差分求导, 利用非线性最小二乘法辨识高阶微分方程系数, 令:

$$R_{Aeq} = \frac{A_0 B_0 + A_1 B_1}{A_0^2 + A_1^2} \quad L_{Aeq} = \frac{A_0 B_1 - A_1 B_0}{\omega(A_0^2 + A_1^2)} \quad (3)$$

$$R_{Beq} = \frac{A_0 C_0 + A_1 C_1}{A_0^2 + A_1^2} \quad L_{Beq} = \frac{A_0 C_1 - A_1 C_0}{\omega(A_0^2 + A_1^2)} \quad (4)$$

其中,

$$\begin{cases} A_0 = a_0 - a_2\omega^2 + a_4\omega^4 - a_6\omega^6 + \dots = \sum_{n=0}^N (-1)^n a_{2n}\omega^{2n} \\ A_1 = a_1\omega - a_3\omega^3 + a_5\omega^5 - a_7\omega^7 + \dots = \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n a_{2n+1}\omega^{2n+1} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} B_0 = b_0 - b_2\omega^2 + b_4\omega^4 - b_6\omega^6 + \dots = \sum_{n=0}^N (-1)^n b_{2n}\omega^{2n} \\ B_1 = b_1\omega - b_3\omega^3 + b_5\omega^5 - b_7\omega^7 + \dots = \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n b_{2n+1}\omega^{2n+1} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} C_0 = c_0 - c_2\omega^2 + c_4\omega^4 - c_6\omega^6 + \dots = \sum_{n=0}^N (-1)^n c_{2n}\omega^{2n} \\ C_1 = c_1\omega - c_3\omega^3 + c_5\omega^5 - c_7\omega^7 + \dots = \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n c_{2n+1}\omega^{2n+1} \end{cases} \quad (7)$$

重复以上步骤列 A-C 或 B-C 回路方程，可得到 C 相参数。从而：

$$\begin{cases} Z_{Aeq} = R_{Aeq} + jL_{Aeq} \\ Z_{Beq} = R_{Beq} + jL_{Beq} \\ Z_{Ceq} = R_{Ceq} + jL_{Ceq} \end{cases}$$

此时等值阻抗值在暂态之后的稳态时间内不变，一直保持到下一个暂态来临。将该稳态电流、电压的第 p 个采样值 $i_A(p)$ 、 $i_O(p)$ 、 $u_A(p)$ ，带入任一相 PCC 采样点到 PCC 零点处的支路方程，例图 1 中 A-O'-Z_n-O，得：

$$u_{O'}(p) = u_A(p) - i_A(p) * Z_{Aeq} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} u_{O'}(p) \\ u_{O'}(p+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_O(p) & \frac{di_O(p)}{dt} \\ i_O(p+1) & \frac{di_O(p+1)}{dt} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} R_O \\ L_O \end{bmatrix} \quad (9)$$

从而求得中性线上的阻抗参数 $u_{O'}(p)$ 、 R_O 、 L_O 。

利用外部扰动先求得负荷侧的参数后，将系统侧等值为如图 2 所示的戴维南等值网络，根据式 (6)，计算系统侧的各个参数。

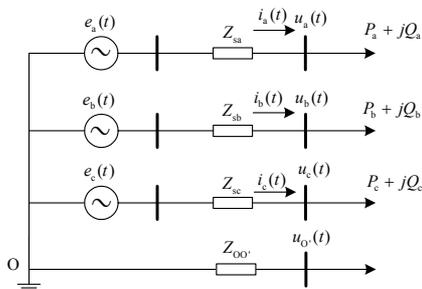


图 2 系统侧戴维南等值网络

Fig. 2 Thevenin equivalent network of system side

$$\begin{cases} [e_a(t) - u_a(t)] = [R_{sa} \quad L_{sa}] \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i'_a(t) \end{bmatrix} \\ [e_b(t) - u_b(t)] = [R_{sb} \quad L_{sb}] \begin{bmatrix} i_b(t) \\ i'_b(t) \end{bmatrix} \\ [e_c(t) - u_c(t)] = [R_{sc} \quad L_{sc}] \begin{bmatrix} i_c(t) \\ i'_c(t) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

本文方法同样可以判断系统侧参数是否对称，以便及时调整。

2 三相负载不平衡参数辨识算例

本文利用暂态电气量结合暂态之后的稳态量对负荷模型参数进行辨识，系统中暂态数据有两类来源：一是电源端扰动引发的暂态过程，称之为外部扰动；二是由负荷内部变化引起的暂态过程，称之为内部扰动。本文只考虑外部扰动引起的暂态过程，下面举例验证。

2.1 发生外部扰动时负荷等值参数辨识

发生外部扰动时简单负荷等值电路仿真模型的如图 3 所示。

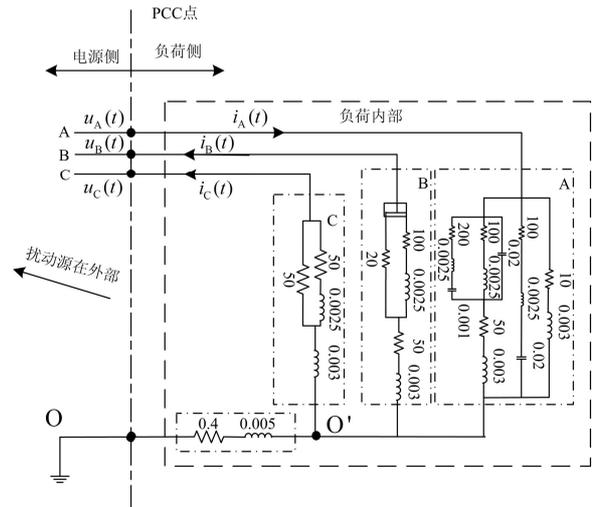


图 3 简单负荷等值电路仿真

Fig. 3 Simulation of simple load equivalent circuit

图中，ABC 三相由对称 380V 电源供电。各电感的单位为 H，电阻的单位为 Ω ，电容的单位为 μF 。利用系统侧进行扰动，模拟除待分析系统外的因素引起的暂态过程，搭建模型如图 4 所示，改变开关 S_a、S_b、S_c 的开闭时间以及各自支路的阻抗值，可以在 PCC 点采集得到不同的暂态情况下的电流电压。

由于篇幅问题，本文只介绍三相开关支路同时断开情况，其余情况计算方法相同。S_a、S_b、S_c 三个支路阻抗分别为 4 Ω 、5 Ω 、6 Ω 。此时负荷三相电流电压波形如图 5 所示。

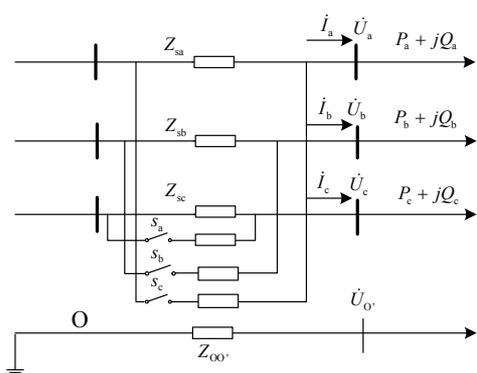
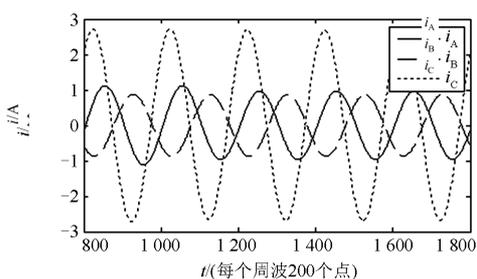
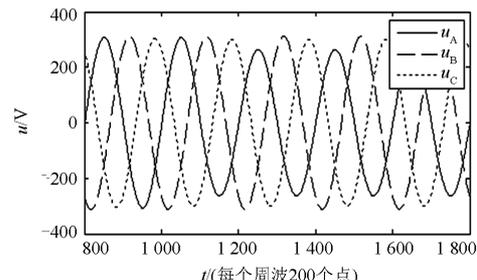


图 4 扰动形式

Fig. 4 Disturbance forms



(a) 负荷三相电流波形



(b) 负荷三相电压波形

图 5 电流电压波形图

Fig. 5 Current and voltage waveform figure

辨识各相等值阻抗步骤如下:

1) 列写 AB 相高阶微分方程模型。按照精度要求选择辨识阶数(本文 K 取 5)得:

$$\sum_{k=0}^5 a_k [u_A(t) - u_B(t)]^{(k)} = \sum_{k=0}^5 b_k i_A(t)^{(k)} + \sum_{k=0}^5 c_k i_B(t)^{(k)} \quad (10)$$

2) 求解各参数。利用最小二乘法辨识式(10)中系数, 带入式(2)、式(3)、式(4)求取模型参数。得到的仿真结果如下表 1 所示(以 $R/\Omega + jL/H$ 表示)。

表 1 简单负荷等值电路仿真

Table 1 Simulation of simple load equivalent circuit

	A 相	B 相	C 相	中性线
真实值	9.3782 +j0.0027	66.6668 +j0.0031	25.0015 +j0.003	0.4+j0.005
计算值	9.2522 +j0.00271	66.9721 +j0.00317	25.1152 +j0.0031	0.389 +j0.00478

辨识得到虚拟中性点电压如图 6 所示。

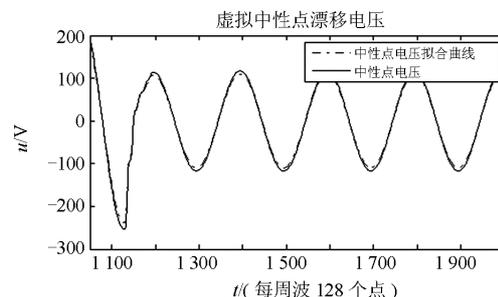


图 6 虚拟中性点电压

Fig. 6 Virtual neutral point voltage of load model

2.2 中性线阻抗变化时仿真验证

假设阻抗变化较小, 此时属于中性线阻抗渐变情况, 模拟由于中性线老化等因素使得中性线等值阻抗随着时间的逐步累积而增大的过程。此时只依靠中性线阻抗的变化在端口处无法检测到扰动信号, 但是在低压用电网中, 内部及外部扰动经常发生, 程序依旧能够运行。将连续两次扰动后的信息进行对比, 容易得到其变化率, 辨识过程如 2.1 节所述, 文中不再叙述。

假设变化率较高, 在检测端口造成扰动, 此时属于突变状况, 主要是由接头松动等因素造成, 中性线阻抗突变情况的仿真模型如图 7 所示。开关 S 在 $t=0.1s$ 时断开, 在 PCC 点处造成一个很小的扰动, 此时负荷三相电流电压波形如图 8 所示。

按照上文方法的计算得到中性线突变时的仿真结果如表 2 所示。

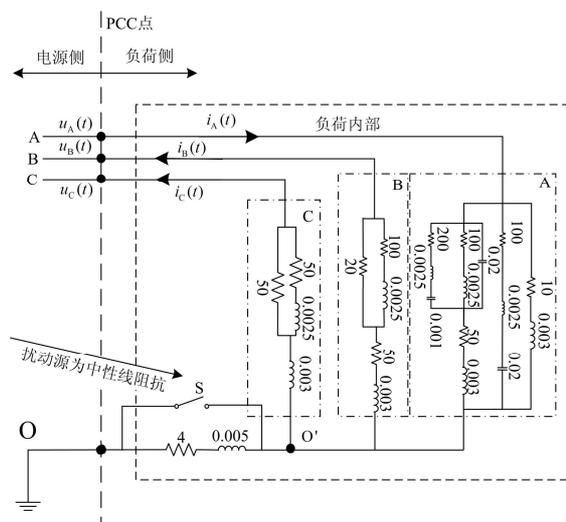


图 7 中性线阻抗突变情况

Fig. 7 Simulation of neutral line impedance mutation

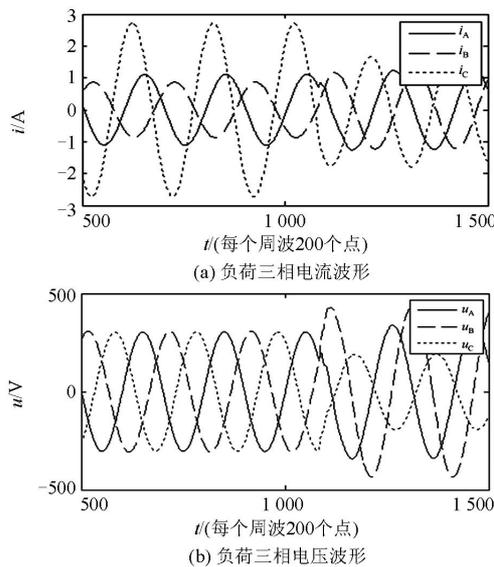


图 8 电流电压波形图

Fig. 8 Current and voltage waveform figure

表 2 中性线阻抗突变仿真结果

Table 2 Results of simulation of neutral line impedance mutation

	A 相	B 相	C 相	中性线
变化前真实值	9.3782 +j0.0027	66.6668 +j0.0031	25.0015 +j0.003	0
变化后真实值	9.3782 +j0.0027	66.6668 +j0.0031	25.0015 +j0.003	4+j0.005
辨识值	9.3011 +j0.00273	65.2329 +j0.00311	25.4128 +j0.0031	4.05+j0.005

从上述两个仿真结果可以看出, 本文所提方法能准确辨识三相等值阻抗、虚拟中性点电压。

3 结论

1) 本文提出一种由网络端口电压和电流信号暂态分量表示的负荷等值模型, 在中性点虚拟电压及中性线上阻抗存在的情况下, 能够正确辨识负荷虚拟中性点漂移电压, 提高了电压保护的可靠性。

2) 在 Matlab 软件上验证了等值模型的有效性和参数辨识策略的可行性, 仿真结果表明, 文章所提算法不受制于前提条件约束, 且能得到比较理想的辨识结果。

3) 本文提出的方法正确表示了低压用电网络等值阻抗, 为有效的安全监测提供了数据方法。

参考文献

[1] 陈春, 汪泓, 刘蓓, 等. 一种智能配电网安全运行控制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 357-366.
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. A method of

Safe operation control of smart distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12):357-366.

[2] 傅军栋, 喻勇, 黄来福. 不平衡负载的一种更加经济的补偿方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 126-132.
FU Jundong, YU Yong, HUANG Laifu. A more economical compensation method for unbalanced load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 126-132.

[3] 曾祥君, 黄明玮, 王文, 等. 配电网三相不平衡过电压有源抑制方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 61-69.
ZENG Xiangjun, HUANG Mingwei, WANG Wen, et al. Research on active suppression method of three-phase unbalanced overvoltage for distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 61-69.

[4] 张占龙, 郭民悻, 叶云霞, 等. 配电变压器零序电流治理优化方法及装置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 44-51.
ZHANG Zhanlong, GUO Minyi, YE Yunxia, et al. The governance optimization method and device research of zero-sequence current in distribution transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 44-51.

[5] 黄伟. 电能计量技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[6] 王葵. 非正弦和不对称负载情况下的功率流向和计费标准[J]. 电力系统保护与控制, 2005, 33(12): 6-9.
WANG Kui. Active power flow and energy accounts with non-sinusoidal waveform and asymmetry load[J]. Power System Protection and Control, 2005, 33(12): 6-9.

[7] 高强, 张宝航, 谷海青. 用户端电能管理系统的研究现状与发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 148-155.
GAO Qiang, ZHANG Baohang, GU Haiqing. Current situation and development of client electric management system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 148-155.

[8] 王勤, 戴先中. 非正弦不对称三相三线制电路负载侧相电压的定义与测量[J]. 电工技术学报, 1997, 12(6): 55-58, 26.
WANG Qin, DAI Xianzhong. The definition and measurement of load's phase voltages in non-sinusoidal unsymmetrical 3-phase 3-wire system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1997, 12(6): 55-58, 26.

[9] 雍静, 周浩. 基于谐波的低压配电干线中性线断线检

- 测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 49-57.
- YONG Jing, ZHOU Hao. A harmonic-based approach for open-neutral fault detection in low voltage systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 49-57.
- [10] 辛业春, 李国庆, 王朝斌. 无功和三相负荷不平衡的序分量法补偿控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 72-78.
- XIN Yechun, LI Guoqing, WANG Chaobin. Compensation control of reactive power and three-phase unbalance load based on the method of sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 72-78.
- [11] 中国机械工业联合会. GB 50054-2011 低压配电设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- China Machinery Industry Federation. Code for design of low voltage electrical installations[S]. Beijing: China Planning Press, 2011.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. BG/T 15543-2008, 电能质量-三相电压允许不平衡度[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. BG/T 15543-2008, quality of electric energy supply-admissible three-phase voltage unbalance factor[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [13] 同向前, 王海燕, 尹军. 基于负荷功率的三相不平衡度的计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(2): 24-30.
- TONG Xiangqian, WANG Haiyan, YIN Jun. Calculation method of three-phase unbalance factor based on load power[J]. Proceedings of the CSU- EPSA, 2011, 23(2): 24-30.
- [14] 姜彤, 郭志忠, 陈学允, 等. 多态相分量法及其在电力系统三相不对称分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 70-74.
- JIANG Tong, GUO Zhizhong, CHEN Xueyun, et al. Polymorphic phase components method and its application in three-phase unbalance calculation of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 70-74.
- [15] 郑国华, 张丽. 电力系统电压的不平衡度讨论[J]. 交通运输工程与信息学报, 2005, 3(4): 45-49.
- ZHENG Guohua, ZHANG Li. Discussion of voltage unbalance in power system[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2005, 3(4): 45-49.
- [16] 晁储乾. 三相电网的三相等值电路及其不对称相分量分析[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- CHAO Chuqian. Three-phase equivalent circuit and asymmetric component analysis of three-phase power grid[D]. Nanning: Guangxi University, 2012.
- [17] 黄少伟, 陈颖, 沈沉. 不对称电力系统相序混合建模与三相潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 68-73.
- HUANG Shaowei, CHEN Ying, SHEN Chen. Hybrid modeling of asymmetrical power system and three-phase power flow method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 68-73.
- [18] 杨焕燕. 不对称配网的三相潮流与状态估计方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- YANG Huanyan. Research on three-phase power flow and state estimation methods for asymmetrical distribution networks[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [19] 杨浩, 仇淑敏, 殷家敏, 等. 基于参数辨识方法的三相不对称负载电能计量[J]. 中国电力, 2013, 46(8): 128-132.
- YANG Hao, QIU Shumin, YIN Jiamin, et al. The electric energy measurement of three-phase asymmetric loads based on parameter identification[J]. Electric Power, 2013, 46(8): 128-132.

收稿日期: 2015-03-12; 修回日期: 2015-09-16

作者简介:

张鹏(1989-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统建模与参数辨识; E-mail: 1121732303@qq.com

罗建(1960-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统继电保护、电力系统建模与辨识等;

吉畅(1991-), 女, 硕士, 从事电力系统建模与辨识、电力系统继电保护相关研究。E-mail: 443264793@qq.com

(编辑 张爱琴)