

# 直流单极-大地方式谐波特性及其对交流保护影响的分析

李海锋, 朱革兰, 王钢, 李文辉

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 直流输电系统单极-大地运行方式对交流电网继电保护产生影响的根源在于直流偏磁导致电力变压器谐波以及电流互感器传变特性的变化, 基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真程序对直流偏磁下的变压器谐波特性以及保护用电流互感器传变特性进行了全面的仿真分析, 得出相应的变化规律与特点, 并以此为基础分析和评估了直流输电系统单极-大地运行方式对交流电网保护的影响。

**关键词:** 直流输电; 直流偏磁; 交流保护; 谐波

## Harmonic characteristics of power transformer for DC bias and its impact on power system protection

LI Hai-feng, ZHU Ge-lan, WANG Gang, LI Wen-hui

(Electrical Engineering College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The monopolar ground circuit operation mode of HVDC system results in the DC bias of power transformers and current transformers in AC power system. It causes the harmonics generated from power transformer and changes the transforming characteristics of CT. Harmonic characteristics of power transformer and transforming characteristics of CT for DC bias are fully studied in the paper by simulation using PSCAD/EMTDC software. The results are used to evaluate the impact on power system protection.

This project is supported by Key Project of National Natural Science Foundation of China(No.50337010).

**Key words:** HVDC; DC bias; harmonics; protective relaying

中图分类号: TM71; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)04-0005-05

## 0 引言

我国目前已建成多个高压直流输电系统以实现大功率、远距离的跨区输电。直流输电系统采用单极-大地方式时, 流入大地的直流电流将很大, 其在交流电网的分流, 可出现大至几十安培的直流电流分量, 特别是当该直流电流流入中性点接地的变压器绕组时将引起变压器的直流偏磁, 使变压器铁芯严重饱和而产生较大的谐波电流, 造成变压器振动增强, 局部过热, 对其安全运行带来很大的影响; 另一方面, 发生直流偏磁后的变压器成为交流系统中的谐波源, 而流经交流电网的直流电流还容易造成电流互感器(CT)的直流偏磁, 从而导致CT传变特性的变化, 这些都可能对交流保护的動作性能产生影响。而继电保护作为电网安全稳定运行的保

障, 其動作性能的优劣至关重要。因此, 深入研究直流单极-大地方式下的谐波特性, 进而分析和评估其对交流保护的影响具有重要的意义。

目前, 对直流单极-大地方式下电力变压器直流偏磁的研究主要集中在对变压器本体影响方面, 如变压器的噪声、发热等<sup>[1,2]</sup>。而为此展开的变压器直流偏磁下铁芯饱和及谐波特性的研究也是基于简单模型的原理性分析<sup>[3,4]</sup>, 缺乏在充分考虑各种复杂因素下对变压器直流偏磁谐波特性的深入研究。而进一步分析其对交流电网及其继电保护的影响则更是空白。本文在分析变压器直流偏磁谐波机理的基础上, 基于 PSCAD/EMTDC 对直流偏磁下的变压器谐波特性以及电流互感器传变特性进行了全面的仿真分析, 得出相应的变化规律与特点, 最后以此为基础分析和评估了其交流电网保护的影响。

## 1 变压器直流偏磁的谐波机理

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(50339010); “十一五”国家科技支撑计划重大项目资助(2006BAA02A30)

变压器直流偏磁产生谐波原因是由于变压器铁芯具有非线性的磁化特性,在直流偏磁的作用下变压器处于饱和状态,可利用图1对这一问题作简单的原理性说明,其中图1(a)为变压器的磁通曲线;图1(b)为变压器的简化磁化曲线;图1(c)为相应的励磁电流曲线。图中的实线和虚线则分别为有、无直流分量时的情况。由图可见,正常情况下铁芯工作在非饱和状态,此时励磁电流很小,而当直流分量使变压器磁化强度偏移并增加到磁化曲线的拐点以上时,变压器铁芯处于半周饱和状态,此时励磁电流显著增大,波形发生严重畸变,正半波出现尖峰,谐波含量也大大增加。

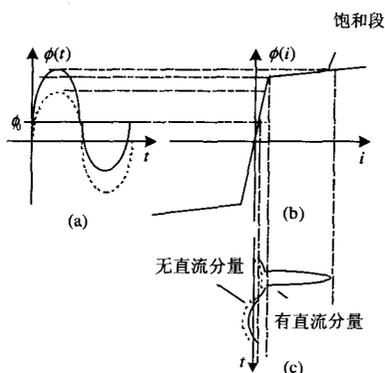


图1 直流偏磁时的变压器励磁电流

Fig.1 Exciting current of power transformer for DC bias

## 2 直流偏磁下的变压器谐波分析

变压器直流偏磁谐波的分析较为复杂,它涉及到变压器的铁芯饱和特性、铁芯的结构、三相变压器各侧绕组的接线方式以及直流偏磁大小等,其求解则涉及到复杂的电路与磁路的耦合关系。

### 2.1 电力变压器模型

传统的变压器模型有矩阵模型和基于耦合原理的经典模型<sup>[5]</sup>。上述模型并没有包含变压器铁心的非线性特性。而在大多数涉及变压器的研究中,变压器的铁芯饱和特性是需要精确模拟的。变压器铁芯除了具有非线性的饱和特性外,其所采用的铁磁材料还具有磁滞现象。各种不同的铁磁性材料有不同的磁滞回线。磁滞特性的存在使变压器铁芯的饱和具有动态的特点。为了简化分析,工程上通常采用简化的静态非线性饱和曲线。在电磁暂态仿真中,变压器的饱和特性可以通过两种方法实现:非线性电感和补偿电流源。

不像基于绕组相互耦合原理的经典模型,变压器的统一等效磁路模型(UMEC)则完全基于铁心

几何结构,因此可以应用于不同的变压器铁心结构:三相变压器组、三相三柱变压器以及三相五柱变压器<sup>[6]</sup>。UMEC 变压器模型采用分段线性等效支路电导的方法模拟铁心的饱和特性。仿真时只需给定反映变压器铁心非线性特性的分段线性化 V-I 曲线。

### 2.2 直流偏磁下变压器励磁电流的简化计算

直流偏磁时,变压器的总磁通是由直流电流产生的直流磁通与正常的交流磁通叠加而成。在已知变压器铁芯磁化曲线的前提下,对于单相变压器模型可以考虑下述边界条件对其励磁电流进行简化计算:a) 励磁电流直流分量等于流经变压器绕组的直流电流;b) 交流磁通由交流电压确定<sup>[7]</sup>。

上述方法求解的关键在于确定流入变压器的直流电流所产生的直流磁通大小。实际上,当饱和发生后,交直流共同作用所产生的直流磁通要比直流电流单独产生的要小很多。这是由变压器铁芯的非线性励磁特性所致。因此在求解时不能简单地利用叠加原理,而必须通过不断的迭代,采用逐步逼近的方法。

### 2.3 电力变压器直流偏磁谐波的仿真分析

显然,上述计算只能对单相变压器进行简单分析,难以考虑更为复杂的情况,如变压器铁芯结构、三相变压器各侧绕组接线方式,等等。为了全面分析变压器的直流偏磁谐波特性,因此采用电磁暂态仿真程序 PSCAD/EMTDC 对电力变压器在不同直流偏磁条件下的励磁电流谐波进行了仿真计算。

仿真中,变压器采用了 UMEC 模型,其中铁芯的磁化曲线是根据给定的铁芯饱和和拐点倍数  $K$  与空心电抗  $L_A$  所确定的一条渐进曲线。饱和和拐点倍数的典型值一般为  $1.15 < K < 1.25$ 。图2给出了磁化曲线分别对应  $K$  值为 1.15、1.20 和 1.25 的三种情况,其中空心电抗取 0.2 p.u.。

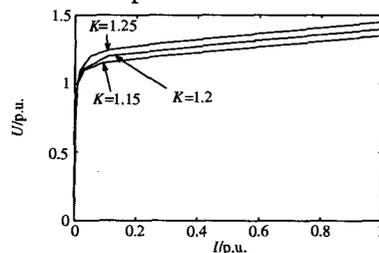


图2 变压器铁芯的磁化曲线

Fig.2 Magnetization curve of transformer core

仿真分析中,考虑了三种变压器铁芯结构:三相变压器组、三相五柱变压器和三相三柱变压器。分析时采用了变压器额定电流作为基准,这样有利于对电网中不同容量的变压器直流偏磁谐波进行比

较和评估。为了考察不同直流电流下变压器励磁电流的谐波特性, 直流电流考虑如下 11 种情况:

0.02 p.u.、0.05 p.u.、0.1 p.u.、0.15 p.u.、0.2 p.u.、0.25 p.u.、0.3 p.u.、0.35 p.u.、0.4 p.u.、0.45 p.u. 和 0.5 p.u.。

### 2.3.1 三相变压器组

#### 1) Y-Y 接线方式

图 3 分别给出了三相变压器组采用 Y-Y 接线方式时, 变压器空载电流 A 相电流以及正、负、零序三序电流对应于不同直流电流时的谐波情况。图中, 横坐标  $I_{dc}$  为流经变压器中性点的直流电流值, 纵坐标为各次谐波电流值,  $n$  为谐波次数。

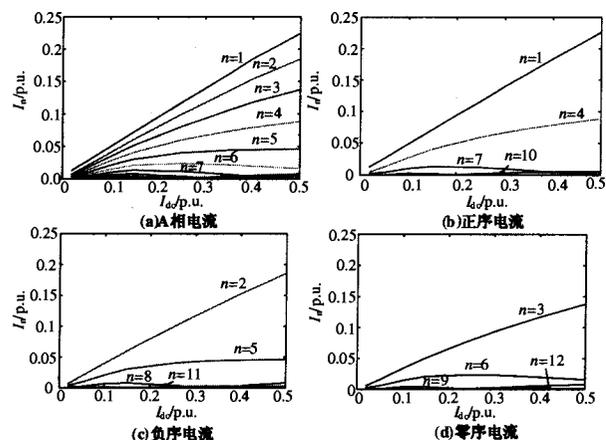


图 3 三相变压器组 Y-Y 接线时的电流谐波

Fig.3 Current harmonic of three-phase transformer bank for star-star configuration

由图可见, 直流偏磁使三相变压器组的励磁电流产生各次谐波, 其分布特点如下:

a) 励磁电流中基波的含量最大, 2、3、4 次等低次谐波次之, 高次 (8 次以上) 谐波含量则很少, 而且各次谐波含量均随着谐波次数的增加而减少;

b) 随着直流电流的增加, 基波及低次谐波分量增加明显, 基波和 2、3、4 次谐波分量几乎是线性增加, 5、6 次谐波则在开始时增加较快, 而在直流电流增加到一定程度后增加缓慢甚至有所降低, 而高次谐波分量则变化不明显, 一直保持较低的含量。

c) 三相变压器组的各序电流主要含各序谐波, 其余谐波的含量均很少, 这是因为三相变压器组各次谐波基本上三相对称的缘故。

图 4 为在相同的直流偏磁电流下, 不同  $K$  值所对应的谐波含量。由图可见,  $K$  值的大小对谐波有一定的影响,  $K$  值越小则各次谐波含量越大。但是这一影响程度在直流电流很大时则大大减弱了, 这是因为在变压器铁芯没饱和之前, 磁化曲线的斜率

很大, 因此很小的直流分量就能产生比较大的磁通, 也就是说对于  $K$  值不同的铁芯, 使其达到饱和点所需要的直流电流相差不会很多。所以当流过较大直流电流时, 所造成的变压器的饱和程度乃至谐波的分布就相差不大。

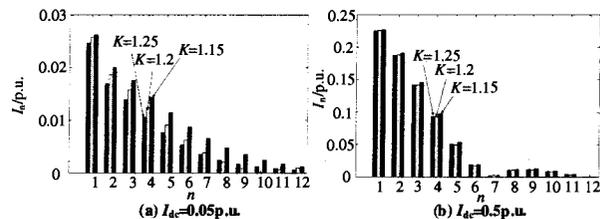


图 4 不同  $K$  值对应的谐波特点

Fig.4 Harmonic analysis for different  $K$

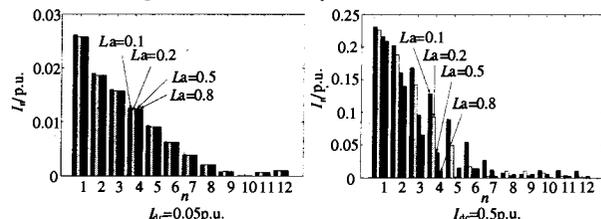


图 5 不同空心电抗所对应的谐波特点

Fig.5 Harmonic analysis for different air core reactances

相对于变压器铁芯的饱和点, 直流偏磁引起的变压器谐波特性受变压器铁芯的空心电抗影响则更为明显。图 5 给出了变压器铁芯在 4 种不同的空心电抗值 (0.1 p.u.、0.2 p.u.、0.5 p.u. 和 0.8 p.u.) 时的谐波比较, 直流电流分别取 0.05 p.u. 和 0.5 p.u.。由图可见, 变压器铁芯的空心电抗越小, 在通过相同直流电流时所产生的谐波就越大, 而且随着直流电流的增加这一差异越来越明显。这是因为空心电抗实际上反映了变压器磁化曲线饱和区的斜率, 空心电抗越小, 相同的直流偏磁产生的励磁电流自然也越大。

#### 2) Y- $\Delta$ 接线方式

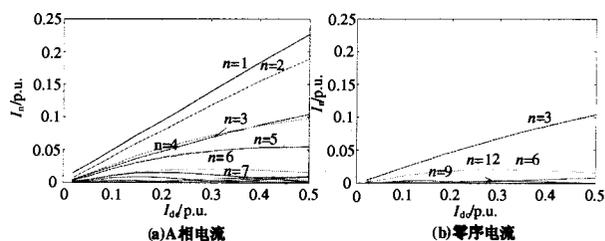


图 6 三相变压器组 Y- $\Delta$  接线时的电流谐波

Fig.6 Current harmonics of three-phase transformer bank for star-delta configuration

图 6 (a) 为三相变压器组采用 Y- $\Delta$  接线方式时,

变压器 A 相电流的谐波情况。根据与前面的 Y-Y 接线方式的仿真分析结果比较可以发现, 两者的谐波特点很相似, 最大的区别在于 3、6、9 等 3 倍频谐波的含量不同。这是因为 Y- $\Delta$ 接线方式的三角形侧为 3 倍频谐波提供了阻抗很低的通路(相当于短路), 因此一部分的 3 倍频谐波将通过变压器的三角形侧分流, 从而使该次谐波的含量减少, 对比图 3 (d) 和图 6 (b) 的零序电流可以明显看出这一特点。

### 2.3.2 三相五柱变压器

图 7 分别给出了三相五柱变压器采用 Y-Y 和 Y- $\Delta$ 接线方式时, 变压器 A 相电流的谐波情况。

比较图 7 (a) 和图 3 (a) 容易看出, 与三相变压器组相比, 在相同直流偏磁的情况下三相五柱变压器所产生的各次谐波分量都要小, 而且直流偏磁越大, 这一差异将越明显。这是因为三相五柱变压器中两个边柱为三相的直流磁通提供了回路, 因此每一边柱所流通的直流磁通要大于单相变压器时的情况, 在直流磁通不大时, 两个边柱的磁阻还能保持比较低的数值, 三相直流磁通与变压器组的相差并不大; 但随着直流电流的增大, 两个边柱的磁阻急剧增加, 从而使三相的直流磁通大大减少, 因此所产生的励磁电流及各次谐波的大小都要降低。

由图 7 (b) 可见, 与前面的分析一样, Y- $\Delta$ 接线方式与 Y-Y 接线方式的最大不同也是在于 3 倍频谐波通过变压器的三角形侧分流, 从而使 3 倍频谐波分量大大减少。

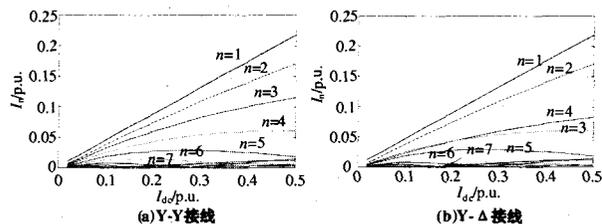


图 7 三相五柱变压器的电流谐波分析

Fig.7 Current harmonics of three-phase five-limb transformer

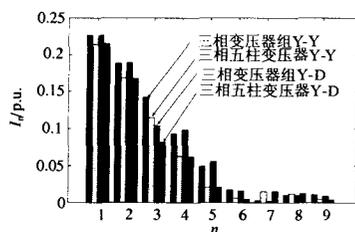


图 8 不同变压器的电流谐波分量比较

Fig.8 Current harmonic analysis of three-phase transformers for different core structures

图 8 给出了三相变压器组 Y-Y、三相变压器组

Y- $\Delta$ 、三相五柱变压器 Y-Y 和三相五柱变压器 Y- $\Delta$  在直流电流为 0.5 p.u. 时的电流谐波含量比较。由图可见, 三相五柱变压器的各次谐波(包括基波)比三相变压器组的小; Y- $\Delta$ 接线方式与 Y-Y 相比, 基波差别不大, 主要差异在于三倍频谐波分量较小。

### 2.3.3 三相三柱变压器

对于三相三柱变压器, 在通过不同的直流偏磁时, 其励磁电流波形只是随着直流电流的大小而偏移, 本身的变化很小。这是因为直流磁通在三相三柱变压器的铁芯中无通道, 直流磁阻较大, 所以直流磁通很小。因此直流偏磁对于这种铁芯结构的变压器影响很小。

### 2.3.4 小结

综合上述仿真分析, 可得如下结论:

a) 直流偏磁下, 变压器的谐波随着直流电流的增加而增加, 在相同的直流偏磁情况下, 三相变压器组的饱和最严重, 所产生的各次谐波最大, 三相五柱变压器次之, 而三相三柱变压器则几乎不受影响。

b) 直流偏磁下三相变压器组产生的谐波大小与变压器铁芯磁化曲线的饱和点、空心电抗值以及变压器两侧的接线方式都有关系。其中, 谐波的大小受饱和点的影响较小, 而对空心电抗值则较为敏感。相同条件下, 变压器 Y-Y 接线方式比 Y- $\Delta$ 接线方式所产生的谐波更为严重, 其差异主要在于 Y-Y 连接时 3 倍频谐波分量较大。

c) 在评估变压器直流偏磁谐波对继电保护的影响时, 从保守的角度出发, 可以考虑三相变压器组 Y-Y 接法以及较小的空心电抗值进行分析。

## 3 直流偏磁对电流互感器传变特性影响分析

当直流输电系统单极-大地运行时, 流入变压器中性点的直流电流必然流经变压器本身的电流互感器以及相关输电线路的电流互感器, 从而产生类似于变压器的直流偏磁现象。两者的区别在于变压器稳定运行点的磁通离饱和点磁通很近, 饱和磁通一般为额定磁通的 1.15~1.25 倍; 而保护用电流互感器饱和磁通则一般为额定磁通的 10~40 倍。与变压器的直流偏磁情况类似, 当电流互感器没有进入饱和之前, 很小的直流电流就会产生较大的直流磁通, 但是当变压器进入饱和区后由于磁阻的增大, 相同直流电流所产生的直流磁通将大大减少。

下面以某一 P 类保护用 CT 为例进行仿真计算, 分析其受直流偏磁的影响情况。互感器参数: 1000/5 A, 额定二次负载 50 VA (2  $\Omega$ ), 5P30。在

30 倍稳态短路电流的相同条件下, 分别加入 0.1 p.u.、0.3 p.u. 和 0.5 p.u. 的直流电流。图 9 给出了上述三种情况与没有直流偏磁时的互感器铁芯励磁电流的波形, 由图可见它们的区别是很小的, 并不足以对电流互感器的传变特性产生根本性的影响。这是因为, 电流互感器的变比很大, 对于 5P30、1000/5 A 的电流互感器, 即使流入一次侧的直流为 0.167 p.u. (对应中性点电流为 0.5 p.u.), 其实只占准确极限短路电流的 0.56%, 因此其影响是很小的。

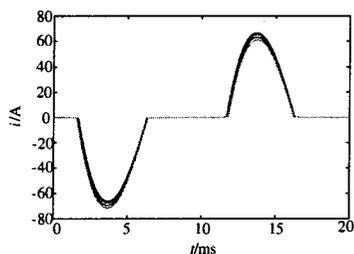


图 9 准确极限下不同直流偏磁对应的励磁电流  
Fig.9 Exciting current for different DC bias under the accuracy limitation

而与普通的保护用互感器不同, “暂态-保护”类 (TP 类) 电流互感器还考虑了故障暂态过程中衰减 (直流) 非周期分量对 CT 传变误差的影响。由于短路暂态过程中, 衰减的非周期分量很大, 远大于直流单极-大地运行时流入的直流电流, 因此直流电流对 TP 类 CT 的影响显然比普通的保护用 CT 更要少得多。

由此可见, 直流偏磁对保护用电流互感器的影响很小, 可以不予考虑。

#### 4 直流单极-大地运行对继电保护影响分析

直流系统单极-大地运行对继电保护的影响主要在于变压器的直流偏磁稳态谐波。就微机保护而言, 谐波对保护的影响一方面与保护采用的算法有关, 另一方面也跟谐波含量的大小有关。

对于一些输电线路保护原理如电流差动保护、方向保护等, 当其采用全波傅氏算法时, 理论上不受谐波的影响, 而实际应用中, 当采样频率满足要求时算法本身受谐波的影响也很小, 因此基本上不受变压器直流偏磁谐波的影响。而对于采用半周积分算法的基于工频变化量等电气量的快速保护原理, 如工频变化量方向保护、工频变化量距离保护等, 从算法上都无法完全消除谐波的影响。这些算法虽然受谐波的影响要比全波傅氏算法的大, 但实际上变压器直流偏磁所产生的谐波对其影响也是非常有限的。这是因为变压器直流偏磁谐波对于短路电流中的谐波贡献很小。考虑很严重的情况, 即三

相变压器组、 $K=1.2$ 、 $La=0.1$ , 在通过 0.2 p.u. 的直流电流时, 直流偏磁产生的二次、三次谐波约为 0.08 p.u. 和 0.06 p.u.。而一般情况下短路电流要远大于额定电流, 因此故障时变压器直流偏磁所产生的谐波分量与短路电流基波的比值是很小的。显然这一含量很小的谐波还不足以对保护算法的性能产生影响。

对于变压器差动保护, 正常运行时其差动量为变压器励磁电流, 因此变压器直流偏磁谐波对变压器差动保护而言不属于穿越性谐波, 其影响值得关注。正常运行时, 在直流偏磁严重的情况下, 直流偏磁产生的变压器励磁电流基波将急剧增大, 如果大于差动保护的定值将造成变压器的差动保护启动, 但是由于一般变压器差动保护都配有二次谐波制动, 而变压器直流偏磁时励磁电流的二次谐波分量很高 (由前面分析可知一般在 50% 以上), 远远高于通常整定的二次谐波系数, 因此即使保护启动也不会造成差动保护的误动。而区内故障时, 对于匝地故障、相间短路或者较严重的匝间短路, 由于差动电流较大, 直流偏磁时励磁电流的二次谐波不会对保护的正确动作造成影响。只有在变压器发生轻微的匝间短路, 差动电流很小, 而变压器直流偏磁二次谐波很大时, 才有可能导致变压器差动保护拒动。但是由前面的分析可知, 即使在直流偏磁为 0.5 p.u. 时, 二次谐波的含量才为 0.18 p.u., 考虑到变压器二次谐波制动系数一般取 0.15~0.2, 因此此时差动电流必须很小, 约为 1 p.u. 左右才会造成保护拒动, 这种情况几乎不可能发生。因此, 总体上看, 变压器保护受直流偏磁的影响也很小。

#### 5 结论

直流单极-大地运行方式下, 直流偏磁对保护用电流互感器传变特性的影响很小, 其对交流保护的影响主要在于变压器直流偏磁谐波。研究表明, 相对于线路保护而言, 变压器直流偏磁谐波对变压器保护的影响更严重一些, 但是总体上看, 影响还是比较小的, 不足以对这些保护的動作性能产生根本性的影响。

#### 参考文献

- [1] 曹林, 曾嵘, 赵杰, 等. 高压直流输电系统接地极电流对电力变压器运行影响的研究[J]. 高压电气, 2006, 42 (5): 346-349.  
CAO Lin, ZENG Rong, ZHAO Jie, et al. Study on the Influence of HVDC System Grounding Electrode Current on Power Transformer Operation[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42 (5): 346-349.

(下转第 41 页 continued on page 41)

端用同样的伪随机码序列来进行同步接收,恢复信息。载波通信的扩频、解扩工作完全由芯片内部的硬件电路实现,解扩阈值可以软件调节。另外,需要配合外围功率放大和接收回路等电路共同构成载波通信的硬件部分。载波通信采用帧同步方式的串行移位通信,半双工方式,速率500 bps,中心频率为120 kHz,带宽为 $\pm 7.5$  kHz。同时,为了解决载波抄表距离瓶颈,PLC载波抄表终端具备中继功能,中继的选择有自动识别和人工指定两种。PLC载波抄表终端通信可靠、一次性抄表成功率达到99.9%,成本低、功耗小,体积小,可安装在电表箱内,方便现有表计的改造,十分适合电力系统的远程集抄应用。

## 2 结论

本文以鞍山供电公司科技项目为基础,充分考虑了系统组建成本、通信实时性、运行可靠性,自主研发 Mobitex 电能管理终端、PLC 载波抄表终端、通信服务器、电力营销应用软件等软硬件设备、在鞍山市铁东区初步建立以 Mobitex 通信技术为主、PLC 载波通信技术为辅的电力营销管理系统,系统具有实时数据采集、远程自动抄表、用电异常信息监测、线损分析、用电数据统计分析、负荷预测分析管理、台区和大客户综合信息管理等功能,可大大提高电力企业的管理水平,具有很好的社会效益和经济效益。

(上接第9页 continued from page 9)

- [2] 尚春. HVDC 地中电流对交流变压器影响的抑制措施[J].高电压技术, 2004, 30(11): 52-54.  
SHANG Chun. Measure to Decrease the Neutral Current of the AC Transformer in HVDC Ground Return System[J].High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 52-54.
- [3] 李长益. 直流单极运行对交流变压器的影响[J]. 华东电力, 2005, 33(1): 36-39.  
LI Chang-yi. Effect of DC Monopole Operation on AC Transformers[J]. East China Electric Power, 2005, 33(1): 36-39.
- [4] 马志强. 变压器直流偏磁的原理性仿真[J]. 广东电力, 2004, 17(2): 1-5.  
MA Zhi-qiang. Simulation of Transformer DC Magnetic Biasing[J]. Guangdong Electric Power, 2004, 17(2): 1-5.
- [5] Dommel H W. EMTP Theory Book[M]. 1986.

## 参考文献

- [1] 祁兵,唐良瑞,龚钢军. 基于Mobitex的电力负荷管理系统设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 83-85.  
QI Bing, TANG Liang-rui, GONG Gang-jun. Design of Power Load Management System Based on Mobitex[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 83-85.
- [2] 何春红,孙毅,周鹏. Mobitex和GPRS技术在电力系统中的应用分析[J]. 现代电力, 2004, 21(4): 70-75.  
HE Chun-hong, SUN Yi, ZHOU Peng. Application Analysis of Mobitex and GPRS Technologies in Power System[J]. Modern Electric Power, 2004, 21(4): 70-75.
- [3] 北京福星晓程电子科技股份有限公司[Z]. 低压载波集中抄表系统说明书, 2006.  
Beijing FuXingXiaoCheng Electronic Technology Co., Ltd[Z]. Reference of Automatic Meter-Reading System for Low-voltage, 2006.

收稿日期: 2007-07-23; 修回日期: 2007-09-06

作者简介:

龚钢军(1974-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为应用电子技术、无线通信、电力系统通信等; E-mail: gonggangjun@126.com

祁兵(1965-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为无线通信、电力系统通信等;

唐良瑞(1966-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为图像处理、电力系统通信、电能质量等。

- [6] Arrillaga J, Enright W, Watson N R, et al. Improved Simulation of HVDC Converter Transformers in Electromagnetic Transient Programs[J]. IEE Proc on Gener, Transm, and Distrib, 1997, 144(2): 100-106.
- [7] Waling R A, Khan A H. Characteristics of Transformer Exciting-current During Geomagnetic Disturbances[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(4): 1707-1714.

收稿日期: 2007-10-15

作者简介:

李海锋(1976-), 男, 博士, 讲师, 主要从事电力系统故障分析与继电保护的教学与科研工作; E-mail: lihf@scut.edu.cn

朱革兰(1967-), 女, 博士, 讲师, 主要从事电力系统故障分析与继电保护的教学与科研工作;

王钢(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护、控制及自动化领域的教学与科研工作。