

基于系统电流检测的并联有源 电力滤波器数字控制方法

曾繁鹏, 王建赟, 伏祥运, 纪延超

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

A Novel Digital Control Method for Shunt Active Power Filter Based on Line Current Detection

ZENG Fan-peng, WANG Jian-ze, FU Xiang-yun, JI Yan-chao

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: On the basis of system current detection a novel digital control method for shunt active power filter is proposed. Applying the proposed method to the shunt active power filter in which the pulse width modulation (PWM) voltage source converter is adopted in the main circuit, in the three-phase three-wire system the active power filter can effectively eliminate harmonics of nonlinear load and compensate its reactive current. In this control method only system current and DC side voltage are to be detected and no referential current is needed. Comparing with traditional control methods, the advantages of the proposed method are simple calculation and less operating parameters to be detected. Here, the theoretical analysis and simulation results of the proposed method are given in detail, and a prototype of three-phase shunt active power filter is designed in which the digital signal processor chip ADMC326 is used as the core of the control. The results from simulation and tests verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

KEY WORDS: Active power filter; Harmonics; Digital control; Pulse width modulation; Power system

摘要: 提出了一种基于系统电流检测的并联有源电力滤波器数字控制方法,应用于以PWM(Pulse Width Modulation)电压源型变流器为主电路结构的并联有源电力滤波器中,对三相三线制系统中非线性负载的谐波和无功电流有理想的补偿效果。该控制方法只需检测系统电流和直流侧电压,无需参考电流,与传统控制方法相比具有检测量少、计算简单等优点。文章给出了理论分析和仿真结果,并以ADMC326(DSP)为控制核心设计了一套三相并联有源滤波器实验装置。仿真和实验结果证明了所提出控制方法的可行性和有效性。

关键词: 有源电力滤波器; 谐波; 数字控制; 脉宽调制; 电力系统

1 引言

非线性负载的大量使用导致电力系统中的谐波含量日益增加,电能质量日益恶化。传统抑制谐波的方法是采用LC调谐滤波器,但它只能补偿固定频率的谐波,并且补偿特性受电网阻抗和运行方式的影响,易与系统发生并联谐振,已不满足现代电力系统发展的需要。有源电力滤波器是一种能动态抑制谐波、补偿无功和消除负载不对称的新型电力电子装置,可克服LC调谐滤波器的缺点^[1,2]。

有源电力滤波器的补偿性能很大程度上取决于所采用的控制方法,其控制系统由指令电流运算电路和补偿电流控制器两部分构成。指令电流运算电路负责检测补偿对象中的谐波电流,能否实时准确地检测谐波电流直接影响到有源电力滤波器的补偿性能。目前采用的谐波电流检测方法有:瞬时无功理论法、同步旋转轴方法、快速傅立叶变换法、自适应检测法等^[3-8]。现有的谐波电流检测方法算法复杂、计算量大,因此实时性较差。补偿电流控制器负责控制变流器产生一个与谐波电流大小相等相位相反的补偿电流,采用的控制方法有:滞环电流控制方法、三角波电流控制方法等^[9-13]。这些控制方法具有响应速度快、精度高的优点,但不易实现数字化。文献[14]提出了无差拍调节控制方法,该方法适用于数字控制,可保证输出与参考量之间无延时,但计算量较大,实际应用时对硬件要求较高。

本文提出一种新的并联有源电力滤波器数字控制方法，该方法与传统控制方法相比有如下优点：①无需计算谐波和无功电流，控制系统的计算量明显减少；②无需检测负载电流和有源滤波器的补偿电流；③控制算法简单，易于实际应用；④克服了传统数字控制延时有源滤波器补偿性能的影响。本文将通过仿真和实验结果验证所提出控制方法的可行性和有效性。

2 理论分析

图1为三相三线制并联有源电力滤波器主电路结构图。图中 i_a 、 i_b 、 i_c 分别为 A、B、C 相系统输入电流； i_{ia} 、 i_{ib} 、 i_{ic} 分别为 A、B、C 相非线性负载电流。电压源型逆变器通过连接电感 L_f 与负载并联接入系统，其直流侧以电容作为储能元件来维持直流电压恒定。为便于分析，将直流电容分为两个等值电容，点 O' 设为直流侧电压参考点，两电容上承受的压降均为 E 。

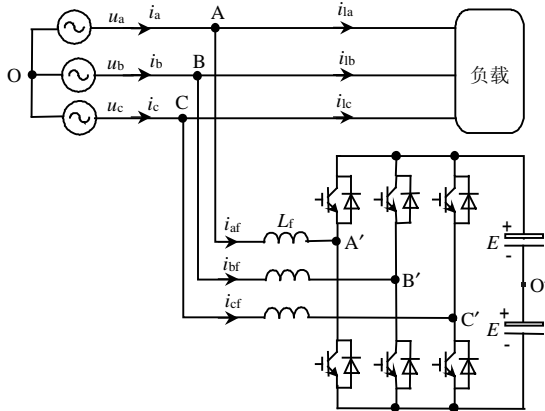


图1 主电路结构图

Fig. 1 Diagram of the main circuit structure

由电路的对称性可知稳态时存在 $U_{OO'} = 0$ ，因此可将其等效为单相电路分析，图2给出了单相等效电路。图中 L_f 为连接电感； u_{af} 为电压源型逆变器输出电压，根据上桥臂和下桥臂开关的状态可取为 E 或 $-E$ ； i_l 为非线性负载电流，包括负载的基波有功电流、无功电流和谐波电流； i_{af} 为流过连接电感的电流，即有源滤波器注入系统的补偿电流，其值通过加在连接电感两端的电压来调整，使补偿电流等于非线性负载的谐波和无功电流之和，以保证系统侧电流为基波有功电流。忽略系统侧线路阻抗，即假设接入点电压与系统电源电压相等，电源电压波形畸变很小，可认为是理想的正弦电压，并且 A、B、C 三相对称。系统稳定后，系统电流 i_s 与电源

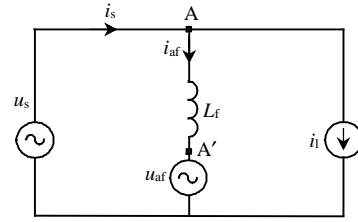


图2 单相等效电路

Fig. 2 The equivalent circuit of the single-phase

电压 u_s 呈线性关系，可将有源电力滤波器和负载的并联等效为纯阻性负载。该控制算法就是利用这一特点并考虑跟踪误差对控制目标的影响推导出逆变器开关占空比的表达式，使一个开关周期结束时实际输出可以完全跟踪控制目标，即保证系统电流与系统电压呈线性关系。由图2可知

$$u_{AA'} = u_s - u_{af} \quad (1)$$

u_{af} 的值取决于逆变器开关状态，上桥臂导通下桥臂关断时 $u_{af} = E$ ，下桥臂导通上桥臂关断时 $u_{af} = -E$ 。逆变器同一桥臂上下开关工作在互补状态，假设下桥臂开关的占空比为 d ，则上桥臂开关的占空比为 $1-d$ ，若开关周期为 T_s ，则可得到两种开关模式的作用时间分别为 dT_s 和 $(1-d)T_s$ 。两种开关状态下各相连接电感上的电压分别为：下桥臂导通、上桥臂关断时有

$$u_{AA'} = u_s + E \quad (2)$$

上桥臂关断、下桥臂导通时有

$$u_{AA'} = u_s - E \quad (3)$$

由式(2)、(3)可知，为有效补偿无功和谐波电流，直流侧电容电压必须大于交流电压峰值。稳态条件下电容电压保持恒定值。为便于分析作如下假设：①直流侧电容足以维持直流侧电压不变；②开关频率远大于系统频率。则可认为在一个开关周期 T_s 内电源电压和直流侧电压 E 保持不变。

由电感元件的特性可知，接入电感两端电压 $u_{AA'}$ 与其补偿电流 i_{af} 之间满足

$$u_{AA'} = L_f \cdot \frac{di_{af}}{dt} \quad (4)$$

由于开关周期 T_s 较小，可将式(4)中的微分用差分代替得到

$$u_{AA'} = L_f \frac{i_{af}(t) - i_{af}(t_0)}{t - t_0} \quad (5)$$

即

$$i_{af}(t) = i_{af}(t_0) + \frac{u_{AA'}}{L_f}(t - t_0) \quad (6)$$

在一个开关周期内，通过 $u_{AA'}$ 的不同取值及其作用时间可控制补偿电流 $i_{af}(t)$ 的大小，即通过选取

适当的开关占空比就可使补偿电流跟踪控制目标。图 3 给出了在一个开关周期内接入电感电压和电流之间的关系。为表示方便，将 k 时刻的补偿电流值 $i_{af}(kT_s)$ 及 $k+1$ 时刻的补偿电流值 $i_{af}[(k+1)T_s]$ 分别记为 $i_{af}(k)$ 和 $i_{af}(k+1)$ 。

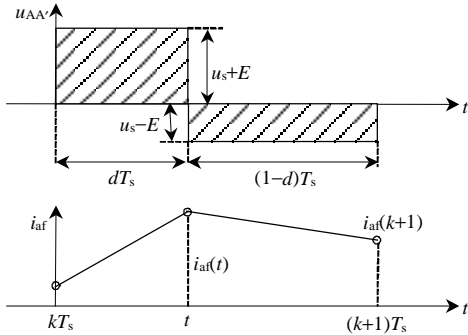


图 3 接入电感 L_f 的电压和电流波形

Fig. 3 Inductor voltage and current waveform of L_f

由图 3 可得

$$i_{af}(t) = i_{af}(k) + \frac{u_s + E}{L_f} dT_s \quad (7)$$

$$i_{af}(k+1) = i_{af}(t) + \frac{u_s - E}{L_f} (1-d)T_s \quad (8)$$

由式(7)、(8)可得

$$i_{af}(k+1) = i_{af}(k) + \frac{2E}{L_f} dT_s - \frac{u_s + E}{L_f} T_s \quad (9)$$

整理可得

$$d = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{u_s}{E} + \frac{L_f}{ET_s} [i_{af}(k+1) - i_{af}(k)] \right\} \quad (10)$$

稳定后的直流侧电压 E 与电网相电压幅值 U_s 满足

$$E = KU_s \quad (11)$$

式中 K 为比例系数。

由前述分析可知，系统稳定后可将负载和有源电力滤波器的并联等效为一个纯阻性负载 R_1 ，即

$$u_s = R_1 i_s \quad (12)$$

可表示为

$$U_s = R_1 I_s \quad (13)$$

式中 I_s 和 U_s 分别为 i_s 和 u_s 的幅值。

由式(11)可得到直流电压为

$$E = KR_1 I_s \quad (14)$$

综合式(12)、(14)可得

$$\frac{u_s}{E} = \frac{i_s}{KI_s} \quad (15)$$

为使有源电力滤波器正常工作，达到所要求的补偿效果，必须使直流侧电容电压 E 维持足够高且

保持稳定，以保证有源电力滤波器在没有输出补偿电流时各桥臂二极管的反向偏置，在进行动态补偿的任何瞬间都能根据控制要求输出所需的补偿电流。但由于补偿电流的时变性和逆变器的自身损耗，如不采取适当的控制措施，直流侧电容电压 E 会产生衰减或有很大的波动，这会使逆变器不能正常运行。控制方法是通过 PI 控制器使直流侧电容电压保持在要求的水平，将电容电压与给定的电压参考值进行比较，并将比较结果送入 PI 控制器，PI 控制器的输出就是电网侧电流期望的幅值 I_s ，即电流基波有功分量的幅值。文献[15]对此进行了详细论述。

将式(15)代入式(10)可得

$$d = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{i_s}{KI_s} + \frac{L_f}{ET_s} [i_{af}(k+1) - i_{af}(k)] \right\} \quad (16)$$

式中 $i_{af}(k+1) - i_{af}(k)$ 为跟踪误差，可表示为

$$i_{af}(k+1) - i_{af}(k) = i_s(k+1) - i_s(k) \quad (17)$$

式中 $i_s(k)$ 为 k 时刻系统电流采样值； $i_s(k+1)$ 为第 k 个开关周期结束时系统电流值，可根据系统电流的控制目标计算。

将式(17)代入式(16)可得

$$d = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{i_s}{KI_s} + \frac{L_f}{ET_s} [i_s(k+1) - i_s(k)] \right\} \quad (18)$$

式(18)给出了开关占空比与基波有功电流幅值 I_s 与系统电流 i_s 之间的关系，通过该式进行简单的计算即可得到各桥臂开关的占空比。式(18)中的 I_s 可由直流电压采样值与直流电压参考值经过数字 PI 调节器的输出生成。式中的 i_s 取 k 时刻系统电流的采样值， $i_s(k+1)$ 的理想值应为幅值为 I_s 的工频正弦波，因此 $i_s(k+1)$ 可通过基波有功电流幅值 I_s 确定。基于式(18)可实现并联有源滤波器的数字化控制，在一个开关周期内控制器首先对系统电流 i_a 、 i_b 、 i_c 和直流侧电容电压 E 进行采样，经 AD 转换器转换后得到 k 时刻的采样值 i_a^k 、 i_b^k 、 i_c^k 和 E^k 。利用式(18)计算出各桥臂开关的占空比 d_a 、 d_b 、 d_c ，送入脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 发生器，经驱动电路控制开关的动作。

3 仿真结果

本文用 Matlab 建立模型对所提出的三相并联有源电力滤波器控制算法进行仿真，仿真参数如表 1 所示。

图 4 为负载电流波形及其频谱，非线性负载为三相整流桥带 RL 负载（电阻和电感负载），由图 4 可以看出负载电流中的 5、7、11、13 次谐波较大。

表 1 仿真系统参数

参数名称	参数值
相电压有效值/V	220
电压频率/Hz	50
开关频率/Hz	9600
连接电感/mH	0.8
变流器直流侧电容/ μF	12000
变流器直流侧电压/V	750
三相整流桥所接电阻/ Ω	7
三相整流桥所接电感/mH	1

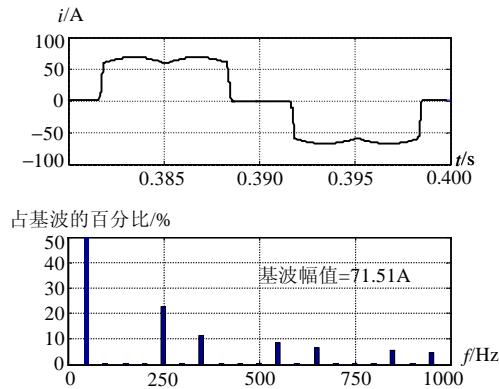


图 4 负载电流波形和频谱

Fig. 4 The load current waveforms and its harmonic spectrum

图 5 为补偿后的系统电流波形及其频谱，由图可知，系统电流中的 5、7、11、13 次谐波被明显消除。负载电流的谐波总畸变率为 24.89%，而补偿后系统电流的谐波总畸变率为 7.81%（计算到 49 次谐波）。系统电流中的高次谐波可利用高通无源滤波器滤除。由图 5 可以看出，当负载电流的 di/dt 较大时系统电流存在尖脉冲，这是由于该控制方法的开关频率固定，在负载电流变化较大时输出电流与参考电流之间存在较大误差。

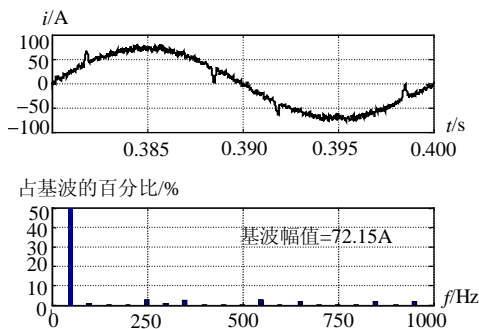


图 5 系统电流波形和频谱

Fig. 5 System current waveforms and its harmonic spectrum

4 实验结果

笔者设计了一套三相并联有源滤波器实验装置，装置的主电路由三菱公司的 IPM 模块 PM75CSA120 构成，系统连接电感为 0.8mH，直流

侧电容为 12000 μF ，开关频率为 9600Hz。控制系统由 ADMC326 (DSP) 构成。

图 6 给出了利用实验装置对接有三相不平衡非线性负载的系统进行谐波抑制的实验结果。图中纵坐标每格为 2A；横坐标每格为 5ms。对以 CSV (Comma Separated Value) 格式存储的数据计算分析可知，通过投入有源滤波器，A 相的谐波总畸变率由 29.36% 降到了 9.11%，B 相的谐波总畸变率由 23.56% 降到了 8.34%（取到了 49 次谐波）。实验结果表明本文提出的数字控制方法可有效补偿非线性负载谐波。

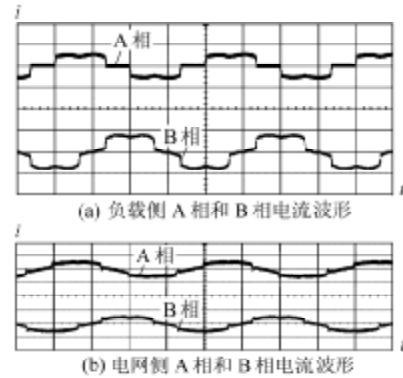


图 6 实验结果

Fig. 6 Experimental results

5 结论

本文提出了一种简单的易于数字化实现的三相并联有源电力滤波器控制方法。仿真和实验结果表明，该方法对于非线性负载中的谐波能达到理想的补偿效果。该方法具有检测量少、无需计算谐波电流的优点，克服了传统数字控制方法中采样和计算延时对补偿性能的影响。简单的算法对于降低控制电路的复杂程度和降低系统成本有重要作用。

参考文献

- [1] 张保会, 康小宁, 袁越, 等. 关于电力系统安全稳定控制装置(系统)基本要求的再探讨[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(9): 60-64. Zhang Baohui, Kang Xiaoning, Yuan Yue *et al.* A proposal concerning the fundamental criteria of control equipments for power system stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(9): 60-64.
- [2] 李战鹰, 任震, 杨泽明. 有源滤波装置及其应用研究综述[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 40-43. Li Zhanying, Ren Zhen, Yang Zeming. Survey on active power filter devices and their application study[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 40-43.
- [3] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching device without energy storage components[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1984, 20(3): 625-630.

- [4] Bhattacharya S, Divan D M. Synchronous frame based controller implementation for a hybrid series active filter system[C]. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1995, 3: 2531-2540.
- [5] 戴列峰, 蒋平, 田大强. 无锁相环 d-q 谐波电流检测法的实现[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 46-49.
Dai Liefeng, Jiang Ping, Tian Daqiang. Realization of harmonic current detection of d-q transformation without phase lock loop [J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 46-49.
- [6] 易仕军, 孙云莲, 陈允平. 一种新的畸变电流检测方法及其实现[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 44-52.
Yi Shijun, Sun Yunlian, Chen Yunping. A novel method for harmonic current detection and its realization[J]. Power System Technology, 2000, 24(8): 44-52.
- [7] 高大威, 孙孝瑞. 基于神经网络的用于有源电力滤波器的电流检测[J]. 电网技术, 2000, 24(1): 72-75.
Gao Dawei, Sun Xiaorui. An adaptive detecting approach of currents based on neural network for active power filter[J]. Power System Technology, 2000, 24(1): 72-75.
- [8] 杨柳, 刘会金, 陈允平. 三相四线制系统任意次谐波电流的检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 41-44.
Yang Liu, Liu Huijin, Chen Yunpin. A new algorithm for random harmonic current detection in three phase four wire system [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 41-44.
- [9] 张剑辉, 姜齐荣, 赵地, 等. 有源滤波器控制器的设计[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 48-52.
Zhang Jianhui, Jiang Qirong, Zhao Di *et al.* Design of active power filter controller[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 48-52.
- [10] David M E, Round S D. Fully digital hysteretic current controller for an active power filter[J]. International Journal of Electronics, 1999, 10(86): 1217-1232.
- [11] 曾江, 焦连伟, 倪以信, 等. 有源滤波器定频滞环电流控制新方法[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 1-8.
Zeng Jiang, Jiao Lianwei, Ni Yixin *et al.* A new current control method for active power filters with constant switch frequency [J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 1-8.
- [12] 习伟, 殷波, 赵子岩, 等. 三相四线制电力有源滤波器的滑模变结构控制[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 18-21.
Xi Wei, Yin Bo, Zhao Ziyang *et al.* Sliding mode control of active power filters in three-phase four-wire system[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 18-21.
- [13] Moran L A, Dixon J W, Wallace R R. Three-phase active power filter operating with fixed switching frequency for reactive power and current harmonic compensation[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1995, 42(4): 402-408.
- [14] Hamasaki S, Kawamura A. Improvement of current regulation of line-current-detection-type active filter based on deadbeat control[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2003, 39(2): 536-541.
- [15] Wu J C. Simplified control method for the single phase active power filter[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 1996, 143(3): 219-224.

收稿日期: 2005-08-29。

作者简介:

曾繁鹏 (1977-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子电路的控制技术及其在电力系统中的应用;

王建颢 (1972-), 男, 副教授, 研究方向为信号处理技术在电力系统中的应用;

伏祥运 (1977-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用;

纪延超 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

(上接第30页 continued from page 30)

- [9] 宋云亭, 周双喜, 鲁宗相, 等. 基于 GA 的输电合成系统最优可靠性计算新方法[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 25-30.
Song Yunting, Zhou Shuangxi, Lu Zongxiang *et al.* A new calculation method for optimal reliability indices of composite power system using GA[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 25-30.
- [10] 杨梓俊, 丁明, 孙昕. 电力市场下综合考虑系统可靠性和旋转备用效益的机组组合[J]. 电网技术, 2003, 27(6): 13-18.
Yang Zijun, Ding Ming, Sun Xin. Unit commitment problem under the condition of electricity market considering system reliability and benefit from spinning reserve[J]. Power System Technology, 2003, 27(6): 13-18.
- [11] Patton A D, Tram N H. Sensitivity of generation reliability indices to generator parameter variations[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(4): 678-683.
- [12] Mello A C G, Pereria M V F, Leite da Silva A M. A conditional probability approach to the calculation of frequency and duration indices in composite reliability evaluation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 1118-1125.
- [13] 赵渊, 周家启. 发输电组合系统可靠性评估的最优负荷削减模型研究[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 34-37.
Zhao Yuan, Zhou Jiaqi. Research of the optimal load shedding model in the composite generation and transmission system reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 34-37.
- [14] EPRI. Mathematical decomposition techniques for power system planning. Volume 3: Analysis of the linearized power flow model in benders decomposition[R]. Report EL-5299, 1988.
- [15] Billinton R, Kumar S, Chowdhury N *et al.* A reliability test system for educational purposes-basic data[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(3): 1238-1244.
- [16] IEEE Committee. IEEE reliability test system[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(1): 2047-2054.
- [17] Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee. The IEEE reliability test system-1996 [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1010-1020.

收稿日期: 2005-10-24。

作者简介:

赵渊 (1974-), 男, 博士后, 从事电力系统规划与可靠性的研究工作, E-mail: zhaoyuan_cqu@yahoo.com.cn;

周念成 (1969-), 男, 博士, 讲师, 从事电力系统继电保护、电压稳定性分析的研究工作;

谢开贵 (1972-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统分析、电力系统规划与可靠性的研究工作;

况军 (1970-), 男, 工程师, 从事输电线路计划检修方面的研究工作。