

电网恢复初期主变饱和导致的小系统功率波动研究

贺星棋^{1,2}, 刘俊勇¹, 胡灿³, 潘睿¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川省电力公司超(特)高压运行检修公司, 四川 成都 610041;
3. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 电力系统恢复初期由于系统阻尼较小, 机组调节能力有限, 在恢复主变的过程中对其空充电将导致薄弱小系统并网机组功率的波动。针对此问题, 从系统恢复初期电网模型的等值电路出发, 分析了线路长度、功率因数及主变铁心饱和导致的系统有功、无功负荷变化之间的关系, 得出系统有功负荷为主变铁心饱和程度的单调增函数, 无功负荷为其单调减函数的变化规律并提出了相应的控制建议。最后通过系统仿真证实了该结论的正确性和有效性, 为系统恢复初期的恢复策略制定及评估提供有益的指导。

关键词: 系统恢复; 铁心饱和; 功率波动; 变压器; 励磁涌流

Study on small power fluctuation caused by transformer saturation in initial period of power system restoration

HE Xing-qi^{1,2}, LIU Jun-yong¹, HU Can³, PAN Rui¹

(1. School of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. EHV/UHV Operation & Maintenance Company, Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China; 3. Sichuan Electric Power Test and Research Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: In the initial period of power system restoration, because the system damping is small and the generator unit regulating ability is limited, the power fluctuation will appear in the small weak system when charging no-load transformer. This phenomenon is studied by the equivalent circuit of initial period of power system restoration and the relations of the change of system active and reactive load resulted from line length, power factor and transformer core saturation degree are analyzed. The conclusion that the active power is monotone increasing function of core saturation degree and the reactive power is monotone decreasing function of core saturation degree is deduced and correlated measures to solve the problem are proposed. At last, the correctness and effectiveness are verified by simulation. The method proposed supplies available guide for the plan and assessment of the restoration.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50977059).

Key words: power system restoration; transformer saturation; power fluctuation; transformer; inrush currents

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0203-05

0 引言

电力系统是一个由发、输、变、配、用五大部分组成的有机整体, 缺一不可。在系统灾后, 系统恢复的首要任务是进行上述五大部分的恢复运行。主变作为电力系统中的重要电气设备, 它承担着电压变换, 电能分配和传输, 并提供相应电力服务, 其安全恢复关系到整个电力系统恢复过程的成败并与负荷的恢复息息相关。同时由于电力系统恢

复初期的网络结构及容量等特点, 主变的恢复对于小系统的安全稳定运行存在较大的不利因素, 因此国内外学者对电力系统恢复初期主变的相关问题进行了较深入的专门研究。

在变压器的恢复过程中由于变压器励磁阻抗可能饱和而产生的非线性, 因此在此过程中存在着各种暂态和动态行为, 由此引发了较严重的过电压问题^[1-2], 对于电力系统恢复初期的变压器过电压控制研究也取得了较多的成果^[3-13]。但当电网经历灾变后的系统恢复期间, 由于水电机组具有启动的快速性及厂用电负荷不大等优点, 因此一般将其作为系

基金项目: 国家自然科学基金项目(50977059)

统恢复电源点,但水电机组一般距离负荷中心较远,此时就极有可能出现小机(或弱电源)带长线路(或容量大的电缆和电容器组)的情况,这是电力系统恢复初期运行方式所具有的典型网络结构及运行特点。此方式下由于系统本身阻尼较小,网架结构薄弱,电网容量不大,在考虑实际的机组振动区、调频容量等因素下发电与负荷的完全匹配也存在很多实际困难,且机组的调节能力也与并网机组数量及其自身调节系统性能紧密相关,因此小系统抵御各种快速动态变化的能力较低。此外,虽然单台变压器的恢复过程持续时间不长,但由于对其充电过程中尤其是大容量变压器情况下的励磁阻抗及励磁涌流变化量相对于原有薄弱小系统具有可比性,导致当变压器励磁阻抗值在铁心饱和的情况下迅速改变时,也将同时改变系统阻抗,且其变化过程是一个动态的电磁暂态过程,而机组对其的调节反应过程是一个机电动态过程,存在一定的时滞性,因此对系统的安全稳定运行可能产生不利影响,因此有必要研究电力系统恢复初期由于变压器励磁阻抗的改变对小网内发电机动态行为的影响。本文首先根据电力系统恢复初期的等效电路对机组行为进行了分析,然后根据理论分析结果对线路长度及功率因数等相关影响因素分别进行讨论并得出了一些有益的结论,最后,通过仿真验证了所得结论,希望能为电力系统恢复初期的恢复策略制定及评估提供一些有益的参考。

1 等效电路分析

按照当前系统恢复的一般流程,在电力系统恢复初期一般系统网架结构比较薄弱,大多为单线联系且并网机组容量较小,同时为维持机组的稳定运行,机组一般带有一定量的负荷及自身厂用电,为分析方便,忽略变压器线圈绕组电阻以及系统等效电阻,图1所示系统代表电力系统恢复初期的电网结构,图2为相应简化等效电路图。

图2中: U_s 为发电机等效电源, L_g 为发电机电感, L_x 为线路电感, C 为线路电容,负荷采用串联的恒阻抗负荷模型, R_1 、 L_1 分别为其基频下的电阻及电抗, L_t 为变压器绕组电感及励磁支路电感。

当开关K闭合时,系统对主变T充电,此时由于主变铁心中剩磁等因素,在外加电压的情况下变压器T铁心将发生饱和,励磁电感迅速下降,将在电路中产生极大的励磁涌流。由电路原理可知此时由发电机看出系统的等效阻抗为^[14]:

$$Z_1 = (Z_{r1} + iZ_{x1})/k \quad (1)$$

其中:

$$Z_{r1} = -\omega^2 L_1 k_1 k_3 + \omega R_1 k_1 k_4 \quad (2)$$

$$Z_{x1} = \omega R_1 k_1 k_3 + \omega^2 L_1 k_1 k_4 \quad (3)$$

$$k = k_3^2 + k_4^2 \quad (4)$$

$$k_1 = L_1 + L_x - \omega^2 C L_1 L_x \quad (5)$$

$$k_2 = 1 - \omega^2 C L_1 \quad (6)$$

$$k_3 = (R_1 k_2 - \omega^2 C R_1 k_1) \quad (7)$$

$$k_4 = \omega k_1 (1 - \omega^2 C L_1) + \omega L_1 k_2 \quad (8)$$

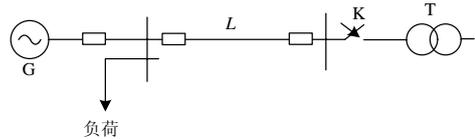


图1 系统恢复初期结构图

Fig.1 Initial period structure drawing of system recovery

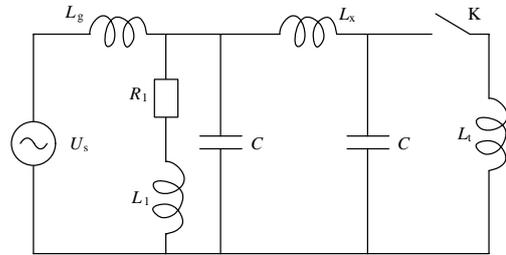


图2 等效电路图

Fig.2 Simplified model of generator, transmission line and transformer

因此,当投入变压器后系统的等效阻抗为:

$$Z = Z_1 + i\omega L_g \quad (9)$$

由于变压器投入后其励磁阻抗将随时间变化而变化,因此此时整个系统的阻抗Z也是一个时变量,假设机端电压在发电机励磁系统作用下保持为常数 U_s ,则发电机供应给系统的有、无功功率分别为:

$$P = U_s^2 Z_{r1} / (k \|Z\|^2) \quad (10)$$

$$Q = U_s^2 (Z_{x1} / k + \omega L_g) / \|Z\|^2 \quad (11)$$

由式(10)、(11)可见,发电机出力与系统结构及运行参数相关,具体到系统恢复初期对主变充电时刻,则为变压器励磁阻抗 L_t 的函数。当 L_t 发生改变时,系统有无功负荷也将相应改变从而影响发电机出力,当由此引发的系统功率变化率及变化量过大时,甚至可能危及此时薄弱小系统的稳定运行。

2 讨论

由上节理论分析可知,在电力系统恢复初期空充变压器时,并网发电机出力将受变压器励磁阻抗

饱和影响而发生改变。当系统额定频率 60 Hz, 发电机等值阻抗 $L_g=0.221$ H, 单位长度线路电抗 $L_x=0.0009337$ H, 单位长度线路对地电容 $C=12.74 \times 10^{-9}$ F, 线路长度 80 km 时, 根据式 (10)、(11) 可得机端负荷功率因数改变时系统有功负载变化率、无功负载变化率随变压器励磁阻抗 L_t 变化关系分别如图 3、图 4 所示。

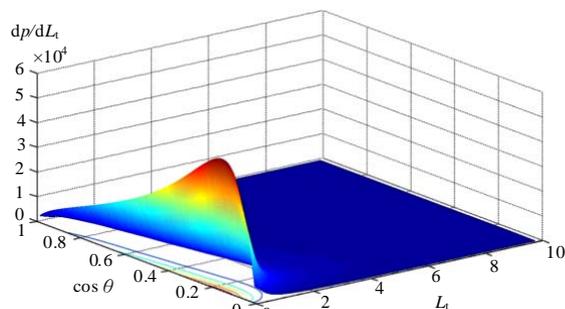


图 3 $dp/dL_t-L_t-\cos\theta$ 关系图

Fig.3 $dp/dL_t-L_t-\cos\theta$ diagram

由图 3 可见, 无论负荷功率因数取何值, 系统 dp/dL_t 始终大于零, 这也从另一方面证明了上节结论的正确性, 系统有功负荷与变压器励磁阻抗 L_t 成增函数关系。同时由图 3 可见, 在 L_t 变化的相当大范围内, dp/dL_t 的变化极其平缓, 这说明只有当变压器励磁阻抗 L_t 极度饱和时系统有功负载才会发生较大的改变。此外, 随着负荷功率因数的增加, dp/dL_t 并非单纯随之单调改变, 过高或过低的负荷功率因数都能有效抑制系统有功负荷的变化速率, 从而保持系统频率的稳定, 但总体说来较高的功率因数能够有效减小有功功率的变化率。

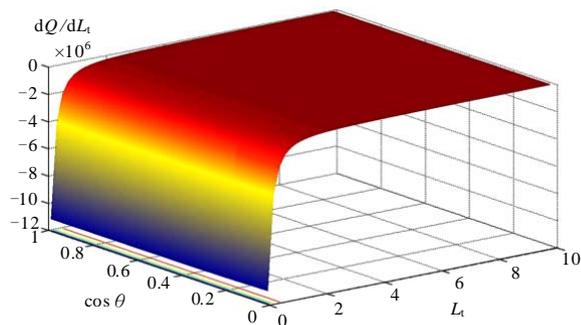


图 4 $dQ/dL_t-L_t-\cos\theta$ 关系图

Fig.4 $dQ/dL_t-L_t-\cos\theta$ diagram

由图 4 可见, 无论负荷功率因数取何值, 系统 dQ/dL_t 始终小于零, 系统无功负荷与变压器励磁阻抗 L_t 成减函数关系。同时由图 4 可见, 与图 3 相似, 在 L_t 变化的相当大范围内, dQ/dL_t 的变化也极其平缓, 这同样说明只有当变压器励磁阻抗 L_t 极度饱和

时系统无功负载才会发生较大速率的改变。此外, 与有功功率不同的是, dQ/dL_t 受负荷功率因数的影响不大。

由以上分析可知, 系统恢复初期, 通过适当提高所供负荷的功率因数, 能够降低变压器恢复所导致的系统有、无功负荷变化率, 减小对系统频率、电压稳定性的冲击, 增强系统的稳定性。

当系统功率因数一定时 (0.85), 改变线路长度将使线路电抗及对地电容同时发生改变, 进而也将使系统阻抗发生相应变化, 根据式 (10)、(11) 可得线路长度改变时系统有功负载变化率、无功负载变化率随变压器励磁阻抗 L_t 变化关系分别如图 5、图 6 所示。

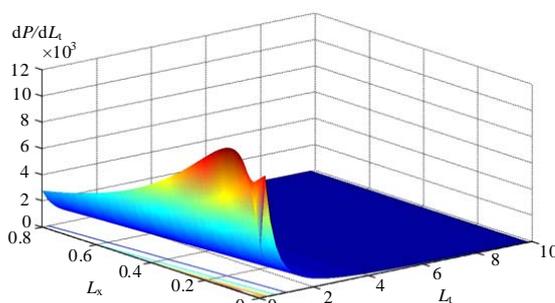


图 5 dp/dL_t-L_t-L 关系图

Fig.5 dp/dL_t-L_t-L diagram

由图 5 可见, 随着变压器铁心饱和程度的增加, 系统有功功率需求将随之而减小, 有功功率变化率则呈非单调的变化, 当线路长度较小时, 随着 L_t 的减小, dp/dL_t 在达到一个极大值后将会快速减小。但当线路较长时, dp/dL_t 则随 L_t 呈单调递增的趋势。因此, 当线路长度适中时, 在变压器极度饱和的情况下可能发生系统有功功率需求的快速变化, 这将对小系统的频率稳定产生不利影响。

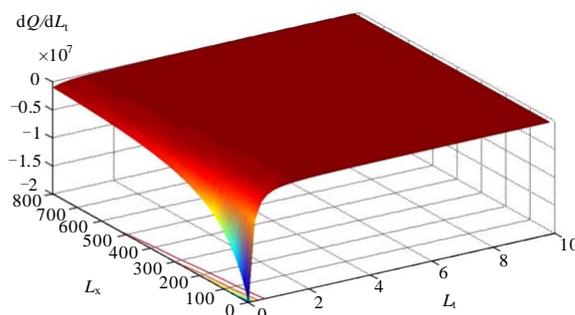


图 6 dQ/dL_t-L_t-L 关系图

Fig.6 dQ/dL_t-L_t-L diagram

由图 6 可见, 在线路长度一定的情况下, 系统无功功率需求与变压器励磁阻抗 L_t 呈单调减函数关系, 且线路长度越短, 当变压器铁心极度饱和时系

统的无功需求变化率越大，过大的无功需求变化可能导致较大的系统电压变化，因此适当增加线路长度即加大机组与变压器之间的电气距离能够有效避免系统电压的大幅波动，但由图 5 可知线路长度的增加又可能增大系统频率的波动幅度，加之过长的空载或轻载长线路在系统恢复初期还存在严重的操作过电压及工频过电压等问题，因此在实际工作中需综合衡量机组的调压、调频以及系统绝缘等各方面因素来综合选择系统恢复的线路长度。

此外，综合图 3~6 可见，在系统恢复初期，恢复变压器导致的有功负荷变化率远小于同期的无功负荷变化率。同时，当变压器在充电电压的作用下深度饱和或具有较高剩磁时，将导致系统无功负荷需求的快速改变，并且由于调速过程为机电过程，励磁阻抗的变化为电磁过程，时间不具可比性，若调速系统时间常数较大，当调速系统动作后变压器铁心饱和程度下降，励磁阻抗逐渐恢复时，由于调速系统的机械惯性，可能导致发电机有功功率过调而使频率降低，这些都是在实际运行中值得关注的问题。

3 仿真验证

依照图 1 系统搭建系统仿真平台，线路参数如上节所示，发电机考虑励磁系统及调速系统作用，额定容量 200 MVA，待恢复变压器采用考虑饱和模型，额定容量 210 MVA，Y₀-Y₀ 接线。当发电机端

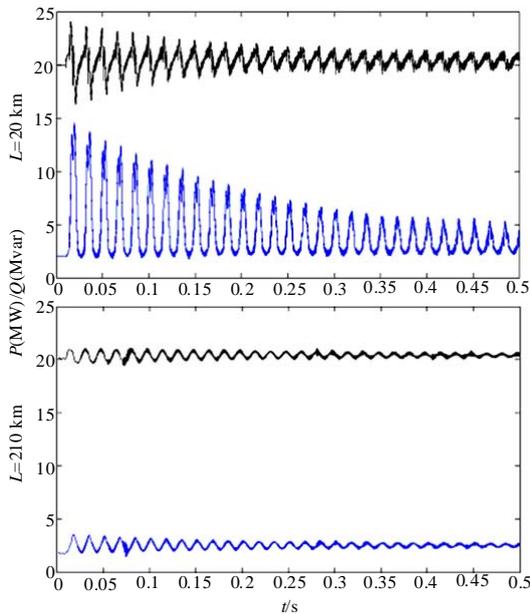


图 7 线路长度变化时发电机有功、无功功率实时曲线
Fig.7 Real-time curves of generator active power-reactive power when line length changes

负荷 20.1 MVA，功率因数 0.995，线路长度 20 km、210 km 时，0.01 s 开关 K 闭合后发电机有功、无功、励磁电压变化曲线分别如图 7、图 8 所示。

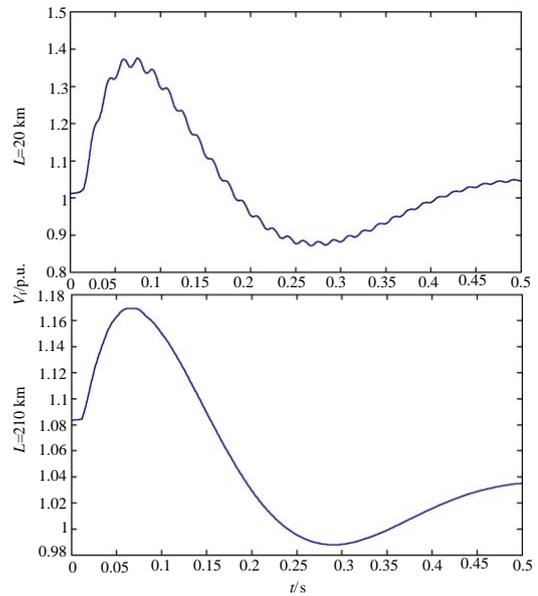


图 8 线路长度变化时发电机励磁电压实时曲线
Fig.8 Real-time curves of excitation voltage when line length changes

由图可见，当开关 K 投入后，发电机有功在短暂的下降后在调速系统的作用下在原有功率值附近总体呈减幅波动变化，同时由于铁心饱和导致系统中出现高次谐波，同时励磁阻抗瞬时骤降，引起系统无功功率需求的增加，引起发电机励磁调节系统的动作而导致发电机励磁电压升高，造成发电机无功出力的增加，随后随着变压器铁心饱和程度开始缓慢下降，励磁涌流逐渐衰减，励磁阻抗也逐渐恢复，系统无功需求也随之下降，发电机无功出力减小，并最终趋于稳定，在无功曲线上就展现为 K 闭合后发电机无功功率呈减幅震荡变化。同时，当线路长度增加时，系统无功变化速率及变化幅度明显变小，发电机励磁电压变化程度也相应降低，开关 K 合闸后瞬间发电机端电压最低值从 0.985 p.u. 上升为 0.999 p.u.，系统电压稳定性得到有效增强，这说明增加发电机与变压器间的电气距离可以有效阻尼系统的无功需求变化，也与图 6 分析结果相吻合。

当线路长度保持 20 km 不变，将系统功率因数调整为 0.37 时，发电机有功、无功、励磁电压变化曲线分别如图 9、10 所示。

由图可见，当负荷功率因数改变时，系统无功功率变化量及变化率改变不大，但有功功率则由于功率因数的减小引起 K 闭合瞬间相对较大的变化

量, 在调速器及高次谐波电流的作用下虽然有有功功率波动幅值达 5 MW 以上, 尽管对系统频率稳定的危害性相对有所增加, 但在发电机调速系统的作用下对于整个系统频率值的影响仍然较小, 频率波动幅度仍然能够保持在正常范围内, 最大改变值仅为 0.0001 p.u. (0.006 Hz)。

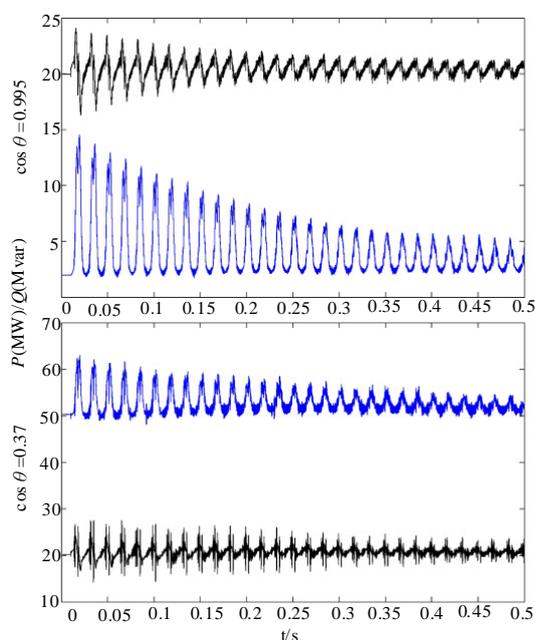


图 9 功率因数改变时发电机有功、无功功率实时曲线

Fig.9 Real-time curves of generator active power-reactive power when power factor changes

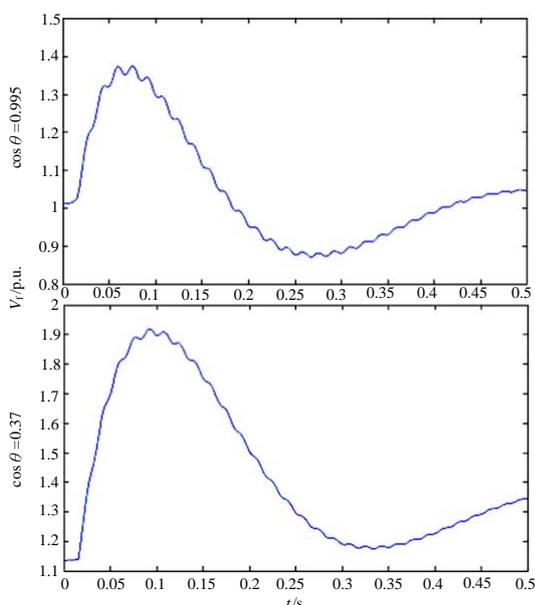


图 10 功率因数改变时发电机励磁电压实时曲线

Fig.10 Real-time curves of excitation voltage when power factor changes

4 结语

电力系统恢复初期由于系统阻尼较小, 网架结构薄弱, 电网容量不大, 机组调节能力有限, 变压器尤其是大容量变压器的空充电过程中可能导致系统运行状况变坏, 本文通过理论推导与仿真相结合的方式讨论了电力系统恢复初期由于变压器铁心饱和导致薄弱小系统有功、无功功率发生波动这一物理现象, 同时对与此物理过程相关的线路长度、功率因数及主变铁心饱和程度与系统有功、无功负荷变化之间的关系进行了分析, 得出系统有功负荷为主变铁心饱和程度的单调增函数, 无功负荷为其单调减函数的变化规律。相对说来, 主变铁心的饱和对小系统无功平衡影响较大, 将导致相对较大的无功功率波动, 而对于有功平衡的影响则相对较小, 因此在系统恢复初期应对此问题进行相应的重视并采取相应措施进行电压稳定控制, 对此可通过增加线路长度即变压器与发电机间的电气距离、减小变压器剩磁、降低变压器励磁涌流等措施加以限制。

参考文献

- [1] Adibi M M, Alexander R W, Milanicz D P. Energizing high and extra-high voltage lines during restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1121-1126.
- [2] Adibi M M, Alexander R W, Avramovic B. Overvoltage control during restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(4).
- [3] 程改红, 徐政. 电力系统故障恢复过程中的过电压控制[J]. 电网技术, 2004, 28(11): 29-33.
CHENG Gai-hong, XU Zheng. A method to control sustained overvoltage during power system restoration [J]. Power System Technology, 2004, 28(11): 29-33.
- [4] 张志毅, 赵秀英. 电力系统恢复过程中过电压校正控制序列的模糊多属性决策方法[J]. 继电器, 2006, 34(21): 33-36.
ZHANG Zhi-yi, ZHAO Xiu-ying. Fuzzy multiple attribute decision-making method on controlling the overvoltage during restoration[J]. Relay, 2006, 34(21): 33-36.
- [5] 马燕峰, 赵书强, 顾雪平, 等. 黑启动过程中操作过电压的仿真计算[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 123-126.
MA Yan-feng, ZHAO Shu-qiang, GU Xue-ping, et al. Simulation of switching overvoltage in black-start[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 123-126.
- [6] 李鹏源, 顾雪平. 基于神经网络的黑启动操作过电压快速预测[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 66-70.

(下转第 211 页 continued on page 211)

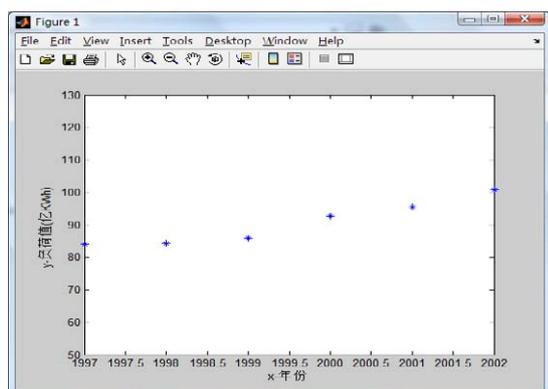


图6 负荷图形

Fig.6 The graphics of load

从图 1~6 中可以看出, VB 与 Matlab 接口良好, 验证了该软件的通用性。

4 结论

本文提出了在地区电网负荷预测软件中, VB 调用 Matlab 程序切实可行的方法, 利用 VB 编制界面, 调用 Matlab 编写的预测程序, 可将 Matlab 强大的数值计算功能和 VB 界面开发简便直观的优势结合起来, 实现了计算参数的交互输入和分析结果的

输出, 并通过实例应用, 取得了较好的连接效果。

利用本接口技术编制的负荷预测软件具有良好的人机交互界面, 缩短了程序的开发周期。在电力系统的预测工作中, 很大程度上减轻了技术人员的工作量, 降低了工作难度。实例证明, 本文所提出的接口技术具有良好的实用性并可推广到其他应用软件中。

参考文献

- [1] 段晓君. MATLAB函数转换为VB可用DLL[J]. 微型机与应用, 2000 (5): 9-11.
DUAN Xiao-jun. MATLAB function converts to VB available DLL[J]. Microcomputer and Application, 2000 (5): 9-11.
- [2] 吴雁, 萧风. Visual Basic 6 入门·提高·实战[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1999.
- [3] 王世香. 精通MATLAB接口与编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.

收稿日期: 2009-10-23; 修回日期: 2009-12-14

作者简介:

杜欣慧 (1965-), 女, 教授, 博士, 研究方向为电力市场、高压直流输电; E-mail: zhanglifang_123@126.com

张丽芳 (1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场。

(上接第 207 页 continued from page 207)

- LI Peng-yuan, GU Xue-ping. Fast determination of switching overvoltage in black start process based on artificial neural networks[J]. Power System Technology, 2006, 30 (3): 66-70.
- [7] 吴义纯, 丁明, 汪兴强. 黑启动过程中空载线路的过电压计算[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2005, 28 (1): 18-21.
WU Yi-chun, DING Ming, WANG Xing-qiang. Calculation of overvoltage across non-loaded overhead line during the power system black-start process[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2005, 28 (1): 18-21.
- [8] Ketabi A, Ranjbar A M, Feuillet R. Analysis and control of temporary over voltages for automated restoration planning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17 (4): 1121-1127.
- [9] Takahiko Funakoshi, Koichiro Furukawa, Toshihiro Kawachino, et al. Transformer overvoltage problems and countermeasures at black start[C]. //Power Engineering Society General Meeting. 2003: 581-588.
- [10] 余涛, 韦曼芳, 陈家荣. 燃油电厂黑启动初期励磁涌流的数字仿真和试验研究[J]. 继电器, 2006, 34 (10): 32-36.
YU Tao, WEI Man-fang, CHAN K W. Simulation and experimental study on transformer excitation inrush current in black-start of oil-fired thermal plants[J]. Relay, 2006, 34 (10): 32-36.
- [11] 黄绍平, 李永坚. 基于 MATLAB 的变压器空载合闸瞬变过程仿真研究[J]. 继电器, 2004, 32 (8): 19-21.
HUANG Shao-ping, LI Yong-jian. MATLAB-based simulation of instantaneous change process when transformer no-load switching[J]. Relay, 2004, 32 (8): 19-21.
- [12] 冀冬晨. 谐振过电压的分析及预防措施[J]. 电力学报, 2007, 22 (3): 390-391.
JI Dong-chen. The analysis and preventive measures of resonance overvoltage[J]. Journal of Electric Power, 2007, 22 (3): 390-391.
- [13] Cheng G H, Xu Z. A method for sustained overvoltage control during power system restoration[C]. //Power Systems Conference and Exposition, IEEE PES. 2004: 473-477.
- [14] 黄远寿, 刘光丽. 电路(上)[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1994.

收稿日期: 2009-10-26; 修回日期: 2009-11-15

作者简介:

贺星棋 (1978-), 男, 博士, 工程师, 长期从事电力系统运行和电网稳定方面的研究; E-mail: hayes.goodman@gmail.com

刘俊勇 (1963-), 男, 博士生导师, 教授, 研究方向为电力系统稳定, 电力市场, 灵活交流输电等;

胡 灿 (1971-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统规划及稳定控制方面的研究。