

Based on Surface Pro Angle Stability of Power System Simulation Analysis

Zhaorui Ni

North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou
Email: nzr1993@sina.com

Received: Nov. 28th, 2013; revised: Dec. 30th, 2013; accepted: Jan. 9th, 2014

Copyright © 2014 Zhaorui Ni. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Zhaorui Ni. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: To study applying intelligent mobile equipment and power system communication, this paper selects Surface Pro as a development platform, with a typical power system dynamic angle stability problem as an example, starting from the instance modeling, programming (computing) process introduced in detail, compiling the software and the actual simulation and the result analysis, trying to provide a compatible with the smart grid development stage of learning style.

Keywords: Surface Pro; Power System; Stability; Program Design; Simulation

基于 Surface Pro 的电力系统转角稳定性仿真分析

倪兆瑞

华北水利水电大学, 郑州
Email: nzr1993@sina.com

收稿日期: 2013 年 11 月 28 日; 修回日期: 2013 年 12 月 30 日; 录用日期: 2014 年 1 月 9 日

摘要: 为了将智能移动设备应用于电力系统学习交流中, 本文选择 Surface Pro 作为开发平台, 以一个典型电力系统动态转角稳定性问题为例, 从实例建模开始, 详细介绍了程序设计(计算)流程, 编制了软件并进行了实际仿真和结果分析, 展示了一种与智能电网发展阶段相适应的学习方式。

关键词: Surface Pro; 电力系统; 稳定性; 程序设计; 仿真

1. 引言

随着智能移动设备(例如智能手机、平板电脑)的逐步普及和 Windows 8 软件生态系统的逐步形成。“Windows 应用商店应用”平台的交互方式, 为与智能电网发展阶段相适应的学习方式的转变提供了可能。

2012 年 6 月 19 日微软公司推出全新硬件品牌 Surface (奢飞思)系列平板电脑。与传统平板设备不同的是, 传统平板设备仅支持触控交互操作, 不支持更

为精确的交互方式, 这就造成传统平板设备娱乐体验突出, 但在需要精确操作的工作领域表现不佳; 而 Surface 平板电脑所安装的 windows 操作系统, 在支持触控操作的同时, 也支持更为精确的鼠标和键盘操作。该产品分两个版本 Surface RT 与 Surface Pro, 分别搭载 Windows RT 操作系统与 Windows 8 Pro 操作系统。Windows RT 是专用于 ARM 架构硬件平台的操作系统, 适用于平板电脑, 但是与传统 PC 软件不兼容。Windows 8 Pro 基于 X86 架构硬件平台, 既适用于平

板电脑, 也适用传统 PC 软件^[1]。

本文选择 Surface Pro 作为开发平台, 以一个典型电力系统动态转角稳定性问题为例, 从实例建模开始, 详细介绍了程序设计(计算)流程, 编制了软件并进行了实际仿真和结果分析^[2,3]。试图提供一种与智能电网发展阶段相适应的学习方式。

2. Surface Pro 开发平台

Surface Pro 开发平台, 硬件基于 X86 架构硬件平台, 软件基于 windows 8 操作系统, 采用 Visual Studio 2012 和 Blend for Visual Studio 2012 为开发工具。Visual Studio 2012 偏重于代码管理、程序调试和分发部署等功能的实现, Blend for Visual Studio 2012 是 Visual Studio 2012 在界面设计方面的有效补充, 它偏重于 Metro 风格的界面设计和动画调试等功能。在实际开发过程中, 需要两个开发工具的协同使用。

开发技术方面有 NET(Visual C#, Visual Basic)、JavaScript、Visual C++ 三种技术, 这三种开发技术各有优势, 其中 .NET 集成了 Silverlight、WPF 和 Windows Phone 多种开发技术, 是目前 Windows 应用商店应用的主流开发技术, 而 JavaScript 侧重于 Web 应用的前端开发, Visual C++ 则偏重于 DirectX 编程、硬件设备编程和算法设计的实现。

开发流程方面主要遵循软件程序开发、本地或远程调试、账号注册和应用程序发布四个步骤。

3. 实例模型

3.1 实例

单机——双回线系统接地故障发电机转角稳定性分析实例, 如图 1 所示。单机双回线路系统中, 一回线中点发生三相经小电抗接地故障时, 发电机的机电暂态过程^[4]。其中, T_l 表示机械转矩, T_e 表示电磁转矩, V_{fd} 表示励磁电压, CB 表示断路器, SW 表示开关, L 表示线路, Z 表示阻抗。电路参数(标么值)如下:

母线 1 电压: $\dot{V}_1 = 1.1 < 5^\circ$, 母线 2 电压: $\dot{V}_\infty = 1.0 < 0^\circ$;

发电机参数: $X_{ls} = 0.1899$, $r_s = 0.003$, $X_{mq} = 1.609$, $X_{md} = 1.609$, $X_{lkq1} = 0.8125$, $r_{kq1} = 0.00178$, $X_{lfd} = 0.1414$, $r_{fd} = 0.000926$, $X_{lkd} = 0.0812$, $r_{kd} = 0.0133$, $H = 5.6$ sec;

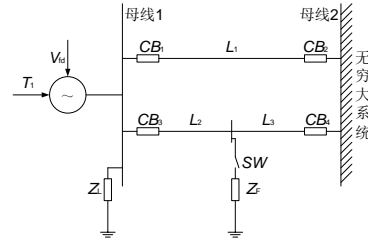


Figure 1. Topology of the example circuit
图 1. 实例电路拓扑

线路参数: $L_1 Z = 0 + j0.20$, $L_2 Z = 0 + j0.10$, $L_3 Z = 0 + j0.10$, $Z_L = 50.0 + j0$, $Z_F = 0 + j0.01$ 。

3.2. 建模

为简化计算, 忽略发电机定子绕组的电磁暂态过程。同时, 本系统是三相平衡系统, 故不考虑零序分量。另外忽略转速变化对速度电动势的影响, 即在定子 q 、 d 轴电压方程中令,

$$\omega_r = \omega_e = \omega_b$$

由上述基本假定及 q 、 d 轴各阻尼绕组无外加电压后, 由 Park 方程^[5-7]得,

$$\begin{cases} p\Psi_{kq1}^r = \frac{\omega_b r_{kq1}}{X_{lkq1}} (\Psi_{aq}^r - \Psi_{kq1}^r) \\ p\Psi_{fd}^r = \omega_b \left[V_{fd} + \frac{r_{fd}}{X_{lfd}} (\Psi_{ad}^r - \Psi_{fd}^r) \right] \\ p\Psi_{kd}^r = \frac{\omega_b r_{kd}}{X_{lkd}} (\Psi_{ad}^r - \Psi_{kd}^r) \end{cases} \quad (1)$$

其中, q 、 d 轴气隙磁链方程为,

$$\Psi_{aq}^r = x_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^r), \Psi_{ad}^r = x_{md} (-i_{ds}^r + i_{fd}^r + i_{kd}^r)$$

电流方程为,

$$\begin{cases} i_{qs}^r = \frac{\Psi_{qs}^r - \Psi_{aq}^r}{-X_{ls}} \\ i_{ds}^r = \frac{\Psi_{ds}^r - \Psi_{ad}^r}{-X_{ls}} \\ i_{kq1}^r = \frac{\Psi_{kq1}^r - \Psi_{aq}^r}{X_{lkq1}} \\ i_{fd}^r = \frac{\Psi_{fd}^r - \Psi_{ad}^r}{X_{lfd}} \\ i_{kd}^r = \frac{\Psi_{kd}^r - \Psi_{ad}^r}{X_{lkd}} \end{cases} \quad (2)$$

将电流方程代入磁链方程得,

$$\begin{cases} \Psi_{aq}^r = x_{aq}'' \left(-i_{qs}^r + \frac{\Psi_{kq1}^r}{x_{lkq1}} + \frac{\Psi_{kq2}^r}{x_{lkq2}} \right) \\ = \left[\frac{1}{x_{mq}} + \frac{1}{x_{lkq1}} + \frac{1}{x_{lkq2}} \right]^{-1} \left(-i_{qs}^r + \frac{\Psi_{kq1}^r}{x_{lkq1}} + \frac{\Psi_{kq2}^r}{x_{lkq2}} \right) \\ \Psi_{ad}^r = x_{ad}'' \left(-i_{ds}^r + \frac{\Psi_{fd}^r}{x_{lfd}} + \frac{\Psi_{kd}^r}{x_{lkd}} \right) \\ = \left[\frac{1}{x_{md}} + \frac{1}{x_{lfd}} + \frac{1}{x_{lkd}} \right]^{-1} \left(-i_{ds}^r + \frac{\Psi_{fd}^r}{x_{lfd}} + \frac{\Psi_{kd}^r}{x_{lkd}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

电压方程为,

$$\begin{cases} V_{qs}^r = -r_s i_{qs}^r + \Psi_{ds}^r \\ V_{ds}^r = -r_s i_{ds}^r - \Psi_{qs}^r \end{cases} \quad (4)$$

q 、 d 轴定子磁链方程为,

$$\begin{cases} \Psi_{qs}^r = \Psi_{aq}^r - \chi_{ls} i_{qs}^r \\ \Psi_{ds}^r = \Psi_{ad}^r - \chi_{ls} i_{ds}^r \end{cases} \quad (5)$$

联立方程(3)~(5), 并将发电机端电压、电流变换到网络坐标可得,

$$\begin{cases} V_{qs}^e \sin \delta + V_{ds}^e \cos \delta + (r_s \sin \delta - x_q'' \cos \delta) i_{qs}^e \\ + (r_s \cos \delta + x_q'' \sin \delta) i_{ds}^e = -x_{aq}'' \left(\frac{\Psi_{kq1}^r}{x_{lkq1}} + \frac{\Psi_{kq2}^r}{x_{lkq2}} \right) \\ V_{qs}^e \cos \delta - V_{ds}^e \sin \delta + (r_s \cos \delta + x_d'' \sin \delta) i_{qs}^e \\ + (-r_s \sin \delta + x_d'' \cos \delta) i_{ds}^e = x_{ad}'' \left(\frac{\Psi_{fd}^r}{x_{lfd}} + \frac{\Psi_{kd}^r}{x_{lkd}} \right) \end{cases} \quad (6)$$

其中,

$$x_d'' = x_{ls} + x_{ad}'', \quad x_q'' = x_{ls} + x_{aq}''$$

转子运动方程和电磁转矩方程为,

$$\begin{cases} p\delta = \omega_b \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} - 1 \right) \\ p \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} \right) = \frac{1}{2H} (T_l - T_e) \end{cases} \quad (7)$$

其中, H 为惯性常数,

$$T_e = \Psi_{ds}^r i_{qs}^r - \Psi_{qs}^r i_{ds}^r = \Psi_{ad}^r i_{qs}^r - \Psi_{aq}^r i_{ds}^r \quad (8)$$

网络方程

$$i_{qs}^e - j i_{ds}^e = \frac{V_{qs}^e - j V_{ds}^e - 1}{Z_t} + \frac{V_{qs}^e - j V_{ds}^e}{Z_{td}} \quad (9)$$

4. 设计与开发

4.1. 核心软件设计

选 Ψ_{kq1}^r 、 Ψ_{fd}^r 、 Ψ_{kd}^r 、 δ 、 ω_r/ω_b 为状态变量。主要开发流程如图 2 所示。

首先, 计算电抗参数包括发电机电抗参数和网络参数。其次, 计算正常运行时的初始值包括状态变量初值和中间变量初值, 例如发电机磁链、励磁电压及电磁转矩的初始值。第三步, 计算系统状态方程(1)、(7)。第四步, 计算状态方程(1)、(7)的系数, 基于以上求得的 Ψ_{kq1}^r 、 Ψ_{fd}^r 、 Ψ_{kd}^r 、 δ 、 ω_r/ω_b 、 V_{eqs} 、 V_{eds} 、 i_{eqs} 、 i_{eds} , 计算状态方程(1)、(7)的系数。第五步, 根据终止条件, 迭代计算直至满足终止判据。

4.2. 程序开发

根据 C++/CX 和 JavaScript 语言各自的特点, 本文将程序主体部分采用 C++/CX 语言编写成 WinRT 组件, 采用 JavaScript 语言完成应用程序的前端开发。在 JavaScript 语言所编写的应用中实现对所编写 WinRT 组件的调用。

算法方面, 微分方程组的求解采用四阶龙格-库塔法, 线性方程组的求解采用全选主元高斯(Gauss)消去法。

5. 仿真结果讨论

本文分别从短路故障对转角稳定性的影响、不同短路阻抗对转角稳定极限切除故障时间的影响和励磁调节对转角稳定性的影响三方面进行了仿真分析。

1) 励磁电压不参加迭代(不进行励磁调节), 三相短路故障(短路阻抗为 $j0.01$)对稳定性的影响。

a) 开始正常运行, 0.1 s 时发生三相短路故障, 且故障不切除时的 $\delta-t$ 波形如图 3(a)所示。由波形可见系统很快失去稳定性。

b) 开始运行就发生三相短路故障, 0.1 s 时切除故障的 $\delta-t$ 波形如图 3(b)所示。由波形可见, 当及时切除故障后, 系统保持稳定运行。

由波形图 3(a)、图 3(b)对比分析可知, 在励磁系统不参与调节的条件下, 三相短路故障的产生将导致

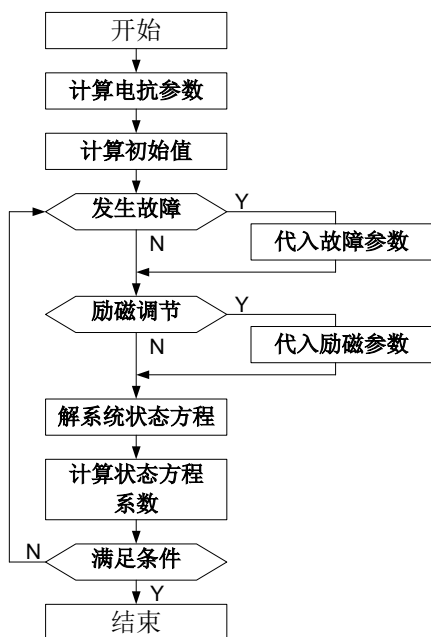


Figure 2. The design process
图 2. 设计流程

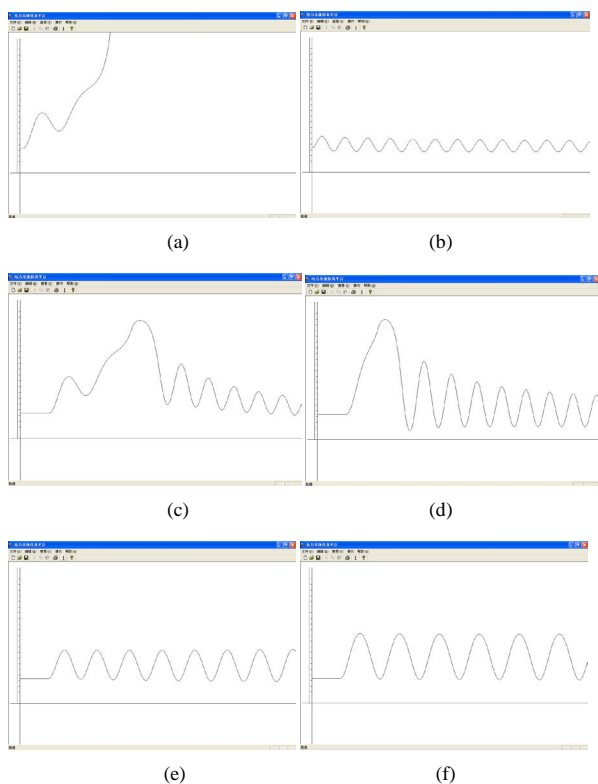


Figure 3. The simulation waveform
图 3. 仿真波形

发电机失去稳定，而当发生故障后，如果及时切除故障，则可保持发电机的稳定运行。

2) 励磁电压不参加迭代(不进行励磁调节)，短路

阻抗不同时对极限切除故障时间的影响。

a) 当短路阻抗等于 $j0.01$ 时：正常运行 1 s 后发生三相短路故障，极限切除故障时间是 3.87 s。即故障后的 2.87 s。 $\delta-t$ 波形如图 3(c)所示。

b) 当短路阻抗等于 $j0.001$ 时：正常运行 1 s 后发生三相短路故障，极限切除故障时间是 2.11 s。即故障后的 1.11 s。 $\delta-t$ 波形如图 3(d)所示。

由波形图 3(c)、图 3(d)对比分析可知，在励磁系统不参与调节的条件下，短路阻抗越小，极限切除故障时间越少。

3) 励磁电压参加迭代(按迭代规律进行励磁调节)，发生三相短路故障时，对系统稳定性的影响。

a) 当短路阻抗等于 $j0.01$ 时：正常运行 1s 后发生三相短路故障。 $\delta-t$ 波形如图 3(e)所示。

b) 当短路阻抗等于 $j0.001$ 时：正常运行 1s 后发生三相短路故障。 $\delta-t$ 波形如图 3(f)所示。

由波形图 3(e)、图 3(f)对比分析可知，如果励磁电压参加迭代(按迭代规律进行励磁调节)则稳定极限大大加强。

6. 结束语

1) 在智能移动设备 Surface Pro 平台上实现了电力系统转角稳定性的仿真软件设计。

2) 以一个典型电力系统动态转角稳定性问题为例，从实例建模开始，详细介绍了程序设计(计算)流程，编制了软件并进行了实际仿真和结果分析。

3) 提供一种与智能电网发展阶段相适应的学习方式。

参考文献 (References)

- [1] 冯瑞涛, 闫妍 (2013) Windows 8 应用开发权威指南. 机械工业出版社, 北京.
- [2] Lu, Q. (2000) Digital power system. *Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation*, 28 June -2 July, Hefei.
- [3] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions (2004) Definition and classification of power system stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, **19**, 1387-1401.
- [4] Kundur, P., 著, 《电力系统稳定与控制》翻译组, 译 (2001) 电力系统稳定与控制. 中国电力出版社, 北京.
- [5] 机械工程手册电机工程手册编辑委员会 (1996) 电机工程手册: 电机卷. 机械工业出版社, 北京.
- [6] 机械工程手册电机工程手册编辑委员会 (1996) 电机工程手册: 输变电、配电设备卷. 机械工业出版社, 北京.
- [7] 《中国电力百科全书》编辑委员会 (2000) 中国电力百科全书. 电力系统卷. 中国电力出版社, 北京.