

文章编号: 1005-0523(2010)04-0057-06

基于 Power World 的电网稳定性可视化分析

孙惠娟, 彭春华, 廖 成

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为了快速直观地掌握电力系统运行发展状态, 应用新型的面向对象的电力系统分析和计算程序 Power World 对电网安全稳定性进行了可视化分析。以 IEEE30 节点系统为仿真对象, 基于 Power World 对系统进行了 N-1 故障计算和对各节点进行了 QV 曲线分析, 并对系统从正常运行到发生大面积电压崩溃的整个发展过程实现了动态仿真, 通过分析寻找出系统的薄弱环节并提出了电网的改善措施。研究结果表明: 性能优越的 Power World 可为电网稳定性分析提供一个新思路与方法。

关键词: 电力系统; Power World; 稳定性分析; 可视化

中图分类号: TM761

文献标识码: A

随着我国电力市场化、地区能源结构不平衡和新技术的不断涌现, 使得电网愈加复杂, 数据激增, 经济性与电网调度所带来的各种约束条件使电网常处于稳定极限附近运行, 近年来世界上许多国家电力系统陆续发生的电网失稳崩溃事故则更加深刻地说明电网稳定性分析的重要性。对于电网调度员与系统设计人员来说, 找到一种直观有效的方法来展示大量而枯燥的电网数据与系统稳定性隐患, 从而准确地分析系统存在的缺陷与定位事故情况下系统的运行方式, 为进一步采取切实可行的优化网络方案和控制措施来保证电网运行的安全性与充裕性显得尤为重要, 而原有 EMS (能量管理系统) 中的数据交互方式已难以满足实际要求。因此, 如何利用现有的系统分析技术、数值分析理论以及计算机数据处理和显示技术构成新的电网运行稳定性分析可视化平台, 已成为亟待解决的问题^[1-3]。为此, 本文将结合实际电网系统数据, 应用新型的面向对象的电力系统分析和计算程序 Power World 来对电网稳定性进行可视化分析, 为电网安全运行提供有效的指导。

1 Power World 简介

Power World 由美国 Illinois 大学的 T.J. Overbye 教授和 M.J. Laufenberg 博士开发, 不仅集电力系统潮流计算、灵敏度分析、静态安全分析等多种庞大复杂功能于一体, 并利用数据挖掘技术实现了强大丰富的三维可视化显示技术^[4]。其核心是一个功能强大的潮流计算软件, 可有效求解多达 100 000 个节点的大型复杂电力系统。同时它通过彩色的单线图来模拟实际的系统, 通过广泛应用动画和图形功能, 使发电机、线路、变压器的投切只需要点击鼠标即可完成。Power World 主要模式为编辑模式与运行模式。在编辑模式中, 可以创建新的实例, 创建修改单线图等等; 运行模式则主要用于解决潮流计算与系统仿真等。除了潮流计算, 程序还集成了以下主要功能:

(1) 最优潮流分析

最优潮流分析提供常规最优潮流计算、考虑各种运行约束和经济约束的最优潮流计算以及相关参与最优潮流的系统各种原件参数的设定和修改。

(2) 电压稳定性分析

电压安全性和稳定性分析工具以内置的牛顿-拉夫逊法进行潮流计算为基础, 允许用户在某特定传输容量下求解多重潮流解, 从而得到给定节点的 PV 或 QV 曲线与相关数据。

收稿日期: 2010-03-22

基金项目: 江西省自然科学基金项目 (2009GZS0016); 江西省教育厅科技基金项目 (GJJ10455)

作者简介: 孙惠娟 (1982-), 女, 硕士, 助教, 研究方向为电力系统可视化分析与计算、电力通信等。 <http://www.cnki.net>

(3) 事故分析

事故分析工具箱提供的功能不仅可以分析电力系统基本示例的拓扑关系,而且可以分析系统的各种稳态和暂态事件的结果。

(4) 等高线功能

Power World 利用地理中等高线的概念,用一系列的色谱表示电压的高低,从而将枯燥的电压数据转化成直观的色彩画面,有助于从整体上去观察和发现全网的薄弱环节。

同时,Power World 将电力系统与地理信息系统进行了有机结合。通过地理信息系统支持功能,可确定系统中各节点和变电站对象的纬度/经度坐标,然后根据对象坐标自动将它们插入到系统图中;可在系统中直接导入 ESRI 格式地理信息形状文件数据以简化系统图的创建,并能在图上显示实时天气信息;图形中地理边界可由 Power World 边界库或用户自定义边界文件自动插入,而 Power World 边界库包含了全世界的地理边界;画面背景连线可转化为输电线路、变电站或节点,并允许作为传输单元导入形状文件,然后转换成模型化地理信息系统对象。此外,软件还支持经济调度、可用传输容量计算、无功优化、三维视图等功能,能够满足用户各种需求。

图 1 展示了采用 Power World 构建的 IEEE 30 节点系统在运行模式下的三维视图。图中采用了黑白色谱,白色表示电压偏高,黑色表示电压偏低;并用运动箭头和立体柱状图直观地展现了系统各部分的功率传输状态,这样用户可一目了然地掌握全网的潮流分布。

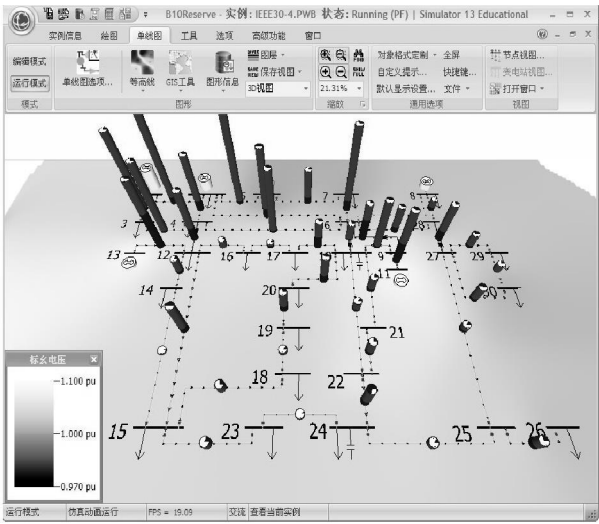


图 1 Power World 运行界面

2 电网稳定性分析

2.1 电压不稳定现象

电力系统中电压失稳与电压崩溃是失去电压稳定性具体的物理现象。对于静态电压稳定性,主要是由以下 2 个方面引起的:

- (1) 负荷持续增加,系统无功储备紧张,传输线潮流接近极限,系统无功的不足难以维持节点电压水平。
- (2) 系统发生扰动或设备发生故障后,相关设备动作引发电压崩溃。主要情况有:失去重要的发电机组,重载线路跳闸引起负荷转移后发生的输电线路相继跳闸,有载调压变压器的负调压作用引发无功缺额进一步扩大等。

2.2 电压稳定性分析模型

对于如图 2 所示的简单电力系统,电源电压为 E_s ,变压器的非标准变比为 k ,输电线路的阻抗为 $Z_L \angle \theta$,负荷阻抗为 $Z_D \angle \varphi$ 。当 $k = 1$ 时,负荷获得的功率或输电线路传输的功率可表示为^[5]

$$P_R + jQ_R = \frac{V_R E_s \cos \theta_R - V_R^2 + j V_R E_s \sin \theta_R}{\frac{X_L}{\tan \theta} - j X_L} \tag{1}$$

由式(1)进一步可导出式(2):

$$\left(1 + \frac{1}{\tan^2 \theta}\right) q^2 + 2 v^2 q + \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \theta}\right) p^2 + \left(\frac{2}{\tan \theta} p - 1\right) v^2 + v^4 = 0 \tag{2}$$

式中: $p = \frac{P_R \cdot X_L}{E_S^2}$; $q = \frac{Q_R \cdot X_L}{E_S^2}$; $v = \frac{V_R}{E_S}$

考虑到 $q = p \cdot \tan \varphi$, 则由式(2)可得到负荷节点在恒定功率因数下的 PV 曲线, 或得到恒定 P 下的 QV 曲线, 可通过所得曲线判断系统的电压稳定性。图 3 为一 PV 曲线示意图, 可见在正常负荷水平下系统存在 2 个电压运行点: 高值电压 U_1 和低值电压 U_2 。一般情况下, 系统稳定运行于高压 U_1 处, 当负荷逐渐加重, 运行点向拐点 B 靠近并最终达到 B 点, 如果负荷持续加重, 则会导致分歧, 出现电压崩溃。拐点 B 表明系统能够传输的功率存在一个极值 $P_{\max}$ 。QV 曲线可参见图 5, 曲线上升过程表明增加注入负荷母线的感性无功功率可使节点电压升高, 说明此时系统是电压稳定的; 反之, 曲线下降过程表明系统是电压不稳定的; 在曲线最低点为临界运行点。对于大型电力系统, 可通过一系列的潮流计算得到指定节点的 QV 曲线, 但如采用常规潮流模型计算, 不仅非常耗时, 且在临界点附近一般难以收敛, 不易得到分析稳定性的有用信息^[6]。而 Power World 则为电压安全性和稳定性分析提供了有力工具。

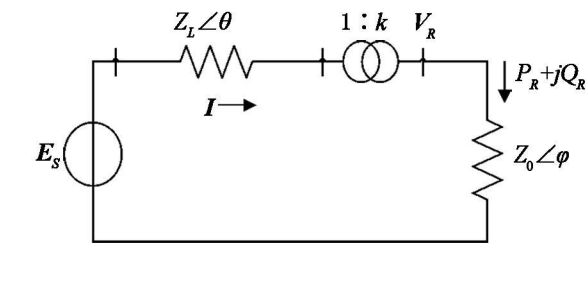


图 2 简单电力系统示意图

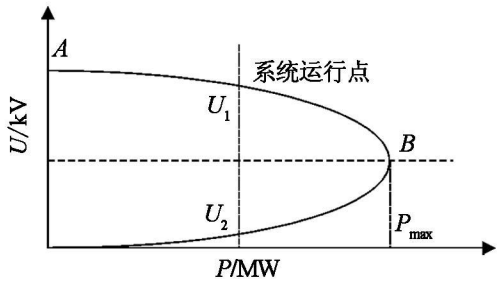


图 3 PV 曲线

3 应用与分析

3.1 电网静态安全性分析

电力系统安全稳定控制的目的是实现在正常运行和偶然事故情况下都能保证电网各运行参数均在允许范围内, 安全、可靠地向用户供给质量合格的电能。系统规划人员在进行发电系统和输电系统规划时, 应用静态安全分析考虑各种可能的设备开断情况, 评估其后果是否满足安全性的要求, 并根据结果增加一些冗余设备或调整计划减少中断供电的可能性。Power World 静态安全分析组件可根据需求选择全网或局部进行 N-1 故障计算, 或对指定的切除方案进行计算, 能快速地检查在给定元件故障条件下系统的状态, 指出系统运行的薄弱环节, 为电网运行、规划提供依据。

在此以 IEEE 30 节点系统为例, 首先根据地理信息系统 GIS 建立仿真模型如图 1 所示, 然后运行 Power World 静态安全分析组件对全网进行 N-1 计算, 在事故定义对话框中选取切除单个线路、变压器或发电机作为检验事故, 总计加入 59 个事故。在运行模式下打开静态安全计算组件, 设置元件监视电压高为 1.10 p.u, 低为 0.97 p.u, 线路极限电流为额定电流。可得部分运行结果如表 1 所示。

可见除去最后一个事故造成越限较严重外, 其它事故导致越限均不高, 都在合理的线路过载范围内。而当 28 号节点与 27 号节点之间的变压器线路断开后, 将造成 7 处元件越限, 具体越限结果见表 2 所示。

由表 2 可知, 28 号节点与 27 号节点之间的变压器线路断开后将造成 2 条输电线路过载, 5 个节点电压偏低。因为这些节点所带负荷远离发电机, 而其功率传输靠 28 号与 27 号节点相连线路。当失去这条线路后, 其传输的功率转移到 22 号于 24 号节点线路和 24 号与 25 号连接线路, 造成这两条线路过载, 且负荷得不到足够的功率支持, 造成了电压降低。

若在 28 号节点与 27 号节点之间在增加一回线路, 再次进行仿真得表 3 结果。可见网络改善后当该 2 回输电线路中的任意一回断开后, 不会造成系统元件发生越限事故, 其它元件结果基本不变, 可显著提高系统的稳定性。

表 1 IEEE30 节点系统静态安全分析结果

事故 ID	越限数	最大支路越限/%	最低电压/p·u
Gen00002U1	1	108.3	
Gen00008U1	1	119.3	
LN00001—00002C1	2	113.1	
LN00001—00003C1	1	109.4	
LN00002—00005C1	2	110.3	
LN00027—00029C1	1		0.964
LN00027—00030C1	1		0.954
TR00028—00027C1	7	131	0.869

表 2 事故(TR00028—00027C1)具体越限

种类	元件	值	极限
线路过载/MVA	22——> 24 CKT 1 at 22	20.97	16
线路过载/MVA	24——> 25 CKT 1 at 24	19.47	16
节点电压偏低/p·u	25 (25)	0.93	0.97
节点电压偏低/p·u	26 (26)	0.91	0.97
节点电压偏低/p·u	27 (27)	0.9	0.97
节点电压偏低/p·u	29 (29)	0.88	0.97
节点电压偏低/p·u	30 (30)	0.87	0.97

表 3 IEEE30 节点改善系统静态安全分析结果

事故 ID	越限	最大支路越限/%	最低电压/p·u
Gen00002U1	1	108.3	
Gen00008U1	1	119.4	
LN00001—00002C1	2	113.1	
LN00001—00003C1	1	109.4	
LN00002—00005C1	2	110.3	
LN00027—00029C1	2		0.958
LN00027—00030C1	1		0.949
TR00028—00027C1	0		

3.2 QV 曲线分析

因 PV 曲线与 QV 曲线分析原理相似,在此仅以 QV 曲线分析为主。在对系统进行电压稳定性分析时,Power World 可模拟在所选节点加入一台虚拟同步调相机并不断改变其无功输出以得到该节点的 QV 曲线。运行 QV 分析后,程序可以自动得到各个节点 QV 曲线。QV 曲线可表示节点电压随节点负荷的鲁棒性,同时表示负荷节点电压和需要补偿的无功功率的关系。调度人员可以根据结果及时调整系统发电机无功出力、无功补偿等维持电压稳定,而设计人员可以发现系统的薄弱环节,从而改善系统结构。

图 4 展示了 21 号节点的 QV 曲线分析运行过程中系统单线图的变化,动态显示了系统从初期局部电压下降(图 4(a))到系统发生大面积崩溃(图 4(b))的发展过程,图中色谱等高线深色区域表示电压失稳区。通过实时仿真显示,可以很清晰直观地了解一次电压崩溃的完整动态过程以及相关元件的各种状态。

通过 QV 曲线分析可计算出各节点的临界电压(拐点)及无功裕度等数据,可得本系统的临界节点是 1 号节点,其临界电压为 0.9 p·u,无功裕度为 124.75 Mvar;弱节点是 10 号节点,其临界电压为 0.632 7 p·u,无功裕度为 137.85 Mvar(该节点已装设无功补偿设备,可适当提高无功补偿设备的补偿度);

(C)1994-2025 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

30 号节点的临界电压为 0.528 0 p.u.,无功裕度仅为 34.22 Mva 且远离电源,并由前面的静态安全分析可知,当其相邻线路开断后(LN00027-00030C1 事故)会导致电压偏低,因此可考虑在 30 号节点添加无功补偿设备。节点 1 和节点 30 的 QV 曲线如图 5 所示。

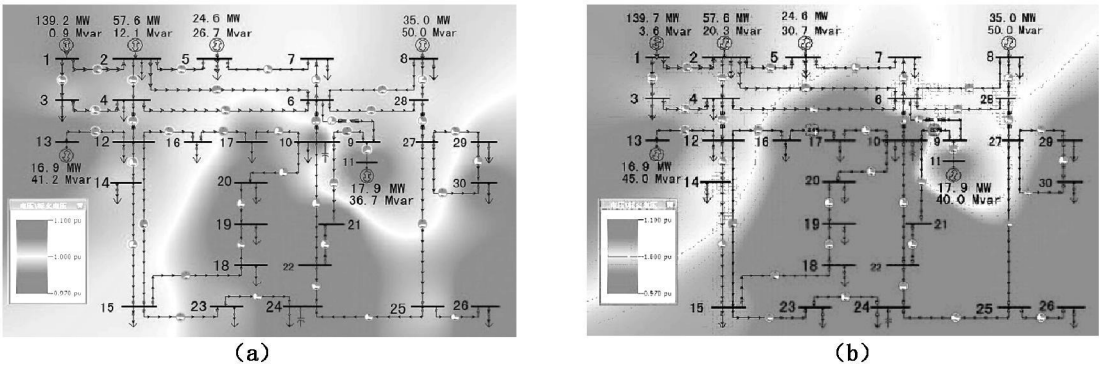


图 4 QV 分析时单线图显示

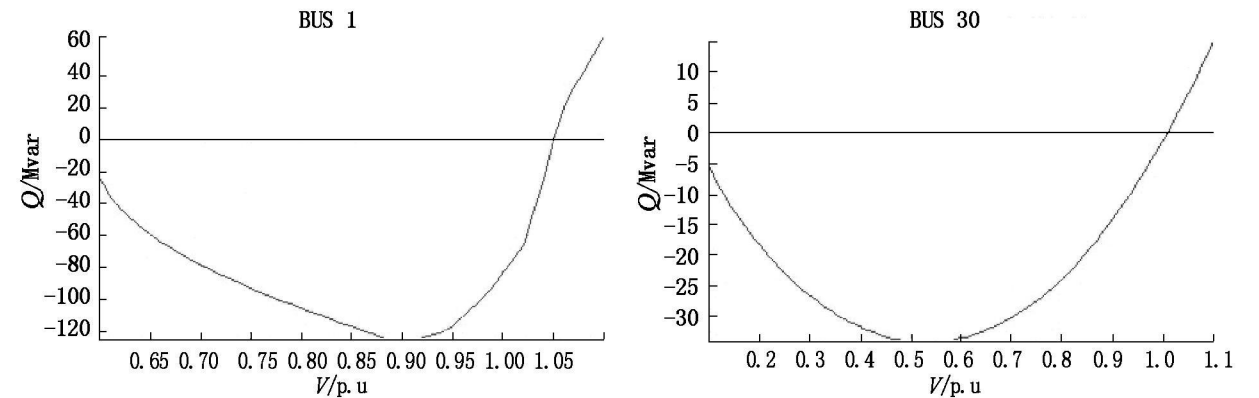


图 5 QV 曲线

综上分析可知,影响系统电压稳定的节点一般主要有两种:

- (1) 重负荷节点和离电源较远(即与之相联支路的 R 和 X 较大)节点;
- (2) 带有较重负荷的发电机节点。如 1 号节点,其为系统主要出力发电厂,切除后将会造成系统较大的有功和无功的缺额。

3.3 电力系统教学与培训

Power World 融合了多种可视化手段来展现电力系统的关键电气信息,包括动画潮流、等高线、三维视图、动态缩放饼图、高亮突显功能、地理信息功能等。能够将潮流、功率等抽象的电气量以及电力系统的动态过程以图形的方式形象地展现出来,且有良好的交互性。用户可利用 Power World 方便而直观地模拟出复杂而抽象的电力系统,如采用动画潮流不仅可表征数据流动的方向,同时还可给出线路负载的直观感觉,借助线路饼图的自动变色及放大功能则可方便地获取具体的越限信息等。对于初学者更好地理解电力系统相关概念非常有效,是极好的教学辅助手段,同时也是学术研究人员深入发掘数据规律的有益工具;此外,其简捷的操作方式和身临其境的模拟环境,以及可方便读取实时或历史断面数据功能,不仅有助于理解系统变化过程的各个细节,同时还可训练利用计算机仿真来解决问题的能力,使得 Power World 在电力系统运行人员仿真培训方面也得到了广泛应用^[7]。

4 结语

电压稳定性并不是电网中一个孤立的技术问题,而是在系统各个层面互相关联,既取决于电网结构的

科学性,也与电网能否正常运行、是否有足够的备用容量有关,在规划中保证电源的合理分布、保证系统充足的无功备用、采取合理的运行方式等都可以提高系统的稳定性。Power World 通过加强数据综合与可视化表达手段以及颜色与 3D 显示技术,为从整个电力系统的角度来观察、分析和处理系统问题提供了一个新的思路与方法,有助于快速掌握系统变化状态从而为电网安全运行和拓扑结构的改进提供有效的指导。此外,Power World 也为电力系统教学和培训提供了一个良好的可视化平台。

参考文献:

- [1] 刘尧,李卫东,吕阳.电力系统运行状态可视化技术综述[J].电力系统自动化,2004,28(8):92-99.
- [2] 韩祯祥,吕捷,邱家驹.科学计算可视化及其在电力系统中的应用前景[J].电网技术,1996,20(7):22-27.
- [3] OVERBYE T J,WEBER J D. Visualizing the electric grid [J]. IEEE Spectrum, 2001, 38(2):52-58.
- [4] OVERBYE T J,SUN Y,KLUMP R P, Weber J D. Interactive 3D visualization of power system information[J]. Electric Power Components & Systems, 2003, 31(12): 1 205-1 215.
- [5] 王锡凡.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2003.
- [6] 刘宝柱,齐郑,李渤龙,等.基于支路潮流可行解域的在线实时电压稳定性分析[J].中国电机工程学报,2008,28(10):63-68.
- [7] 覃惠玲,张菁,MARK LAUFENBERG. Power World 功能在电力系统中的应用[J].广西电力,2009,32(5):12-15.

Visualization Analysis of Power System Stability Based on Power World

Sun Huijuan, Peng Chunhua, Liao Cheng

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to quickly and intuitively grasp the operation state of power system, a new type of object-oriented power system analysis and the calculation program Power World are applied to analyze visually security and stability of grid. With IEEE 30-bus system as the simulation object, based on Power World, N-1 fault calculation and various nodes of the QV curve are analyzed, and a dynamic simulation of the entire developing process of the system from the normal operation to voltage collapse occurred in a large area is conducted. The weak links in the system is found through the analysis, and ultimately measures are put forward to improve the power grid. The study results show that Power World can provide a new way of thinking and methods of analyzing power system stability.

Key words: power system; Power World; stability analysis; visualization

(责任编辑 刘棉玲)