

供电系统中闪变源定位研究

堵俊, 郭晓丽, 张新松

(南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226007)

摘要: 电压闪变是电能质量的重要问题之一, 电压闪变严重影响用电设备的正常运行。长期以来学者对闪变的研究多是对闪变信号进行检测, 以求得闪变参数。与此同时, 对闪变源的定位研究却很少, 这使得解决电压闪变问题缺少针对性的措施。通过分析, 认为是负荷参数的波动导致了电压闪变。接着, 提出了供电系统中的闪变源定位算法。算例计算表明: 该算法可以快速有效地定位出供电系统中的闪变源, 从而可以找出闪变的责任者, 为解决电压闪变问题提供有益的参考。

关键词: 电能质量; 闪变; 闪变源; 戴维南等效; 负荷

Research on identification of flicker source in power supply system

DU Jun, GUO Xiao-li, ZHANG Xin-song

(Nantong University Electric Engineering College, Nantong 226007, China)

Abstract: The flicker is one of the important aspects of the power quality, it can affect the operation of load. For a long time, the most research on flicker is how to measure the flicker signal and get the flicker parameters. At the same time, the research on mechanism and identification of flicker load is very little. So it is difficult to resolve the flicker. This paper considers the fluctuation of the load parameters deduce the flicker of voltage. Then an arithmetic used to identify the flicker load is presented in this paper. The example shows this arithmetic can identify the flicker source of the power system fleetly and effectively, accordingly confirm the responsibility of voltage flicker.

Key words: power quality; flicker; flicker source; thevenin equivalent; load

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)04-0062-04

0 引言

随着电力负荷功率的逐渐增大, 尤其是冲击性负荷如电弧炉、轧钢机急剧增加, 电能质量受到了越来越多的严重影响。在冲击性负荷作用下, 供电系统的公共连接点(PCC)的电压将会出现不稳定, 产生电压波动问题。闪变会影响用电设备的正常工作。如电压闪变会引起车间、工作室和生活起居室等场所照明灯光闪烁, 使人的视觉易于疲劳甚至难以忍受而产生烦躁情绪, 降低了工作效率和生活质量^[1]。目前对电压闪变的研究多是如何检测闪变信号, 即采用诸如傅立叶分析, 小波变换^[2,3], 希尔伯特变换^[4]等各种方法从电压波动信号中提取低频调制波的幅值和频率用以计算闪变参数^[5]。

一旦发生闪变, 必须快速有效对供电系统中的闪变源进行定位, 否则就没法明确闪变责任者。没有闪变责任者, 就使解决电压闪变问题缺少针对性

的措施。目前关于这方面的研究还比较少, 文献[6]提出分别测量单条支路对母线的闪变影响的方法来确定闪变负荷, 将每条支路串联上一个电抗, 通过短路阻抗计算电压降, 用以判断闪变负荷, 该方法操作复杂, 不能够实时应用。文献[7]提出了将工频的电压降用每条支路电流和短路电抗来表示, 并假设每条支路引起的电压降都是同相位的, 但是当电流剧烈变化时该方法会出现错误。

通过分析, 本文认为是供电系统中某些冲击性负荷的参数波动导致了电压闪变。因此闪变源定位算法的核心就是根据PCC上各负荷的电压、电流录波数据识别负荷参数。算例计算表明, 该闪变定位算法可以有效地寻找出系统中的闪变负荷, 从而为解决闪变问题提供理论指导。

1 闪变原因分析

闪变负荷接入供电系统后会导致PCC电压闪变, 为了分析闪变机理, 本节对供电系统做了简化。相对于供电系统, 高电压等级的电力系统的容量可

以视做无穷大,因此根据戴维南定理,供电系统可以用一个等效理想电源和串联电抗表示(高电压等级系统的等效电阻远小于等效电抗,故此模型中不予考虑);负荷可以用可变阻抗 $R+jX$ 表示。图1给出了供电系统的等效示意图和电压相量图,图中 \dot{U}_s 和 \dot{U} 分别为等效理想电源电压和 PCC 电压; X_l 为戴维南等效电抗(包括系统电抗和线路电抗); \dot{U}_l 为线路电压降,其值为 $jI X_l$; φ 为负荷的功率因数角。

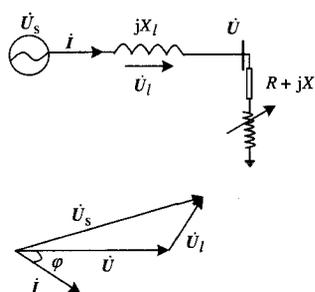


图1 供电系统示意图

Fig.1 Sketch map of power system

在图1所示的简化供电系统中,根据基尔霍夫电压定理有:

$$\dot{U}_s = \dot{U} + \dot{U}_l = \dot{I}(R + jX + jX_l) \quad (1)$$

由式(1)可以看出,在此供电系统中,若负荷 $R+jX$ 的阻抗参数发生波动,其必然会导致线路电流 I 发生波动,进而导致线路压降 U_l 发生波动。而等效电源 U_s 为理想电源,其输出电压不会改变,因此 U_l 的波动必然会导致 PCC 的电压 U 的波动,从而发生闪变。

从上面的分析过程可以看出,正是负荷参数的波动导致了电压闪变。在供电系统中,参数波动的闪变负荷大多是非线性负荷,如电弧炉和频繁启动的电焊机、电动机等。

2 闪变定位算法

供电系统中一旦发生闪变,就必须能够对闪变源进行定位,并采取针对性的措施抑制闪变。而单纯根据畸变的负荷电流波形并不能判断某一负荷支路就是闪变源。实际上,负荷参数是联系负荷电压、电流的纽带,其波动是导致闪变的“罪魁祸首”。在供电系统中,若能根据负荷电压、电流数据识别出波动负荷,就可以对闪变源进行定位。因此闪变定位算法的核心就是如何建立负荷模型并对其参数进行识别。

在分析电能质量问题时,必须进行电网的电磁

暂态过程仿真,通过代数微分方程求解负荷的电压、电流瞬时值。因此,此时的负荷模型的参数不是以相量形式表征的方均根值,而是随时间变化的瞬时值。考虑到供电系统中的负荷绝大多数为感性负荷,本文建立了如图2所示的负荷暂态模型,该模型中电阻 $r(t)$ 和电感 $l(t)$ 都是时变非线性元件。显然,该图中的电压电流瞬时值满足式(2):

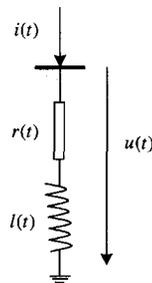


图2 负荷模型

Fig.2 Model of load

$$u(t) = r(t) \cdot i(t) + l(t) \cdot i'(t) \quad (2)$$

负荷电压和电流录波数据分别为 $\{u(k), k=1, N\}$, $\{i(k), k=1, N\}$, 采样频率为 F_s 。定义负荷电流的一阶导数如下:

$$i'(k) = \frac{i(k+1) - i(k)}{\Delta t} = [i(k+1) - i(k)] \cdot F_s \quad (3)$$

则离散化后的负荷电压、电流之间的关系式为:

$$u(k) = r(k) \cdot i(k) + l(k) \cdot [i(k+1) - i(k)] \cdot F_s \quad (4)$$

在每个采样点上 $u(k)$ 和 $i(k)$ 为已知量, $r(k)$ 和 $l(k)$ 为待求量,显然无法单独由式(4)求出两个待求量。一般来讲,系统中负荷参数的波动往往是低频的,其频率远远小于采样频率,故可认为在连续两个采样点上 $r(k)$ 和 $l(k)$ 保持不变。因此有:

$$\begin{cases} u(k) = r(k) \cdot i(k) + l(k) \cdot i'(k) \\ u(k+1) = r(k) \cdot i(k+1) + l(k) \cdot i'(k+1) \end{cases} \quad (5)$$

很显然式(5)是一个简单的线性方程组,对其进行求解就可以求出负荷参数 $r(k)$ 和 $l(k)$ 。

值得注意的是,利用该算法进行闪变源定位的前提是确定闪变源所处的电压等级。文献[8]详细分析了闪变在不同电压等级间的传递规律,利用此规律可以判断闪变源所处的电压等级。

3 系统暂态仿真模型

图2给出了供电系统的暂态仿真模型。根据戴维南等效定理,该模型中供电系统用一个理想的电压源和串联电抗表示。负荷采用上一节介绍的暂态模型。

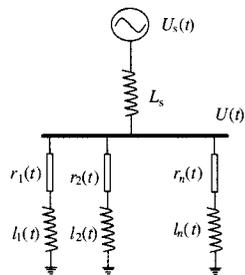


图3 供电系统模型

Fig.3 Model of power system

该暂态仿真模型中有 n 个负荷，设其负荷电流分别为 $i_k(t)$ ($k=1, \dots, n$)，母线电压为 $u(t)$ ，则该模型中有：

$$\begin{cases} u(t) = r_1(t) \cdot i_1(t) + l_1(t) \cdot i_1'(t) \\ u(t) = r_2(t) \cdot i_2(t) + l_2(t) \cdot i_2'(t) \\ \vdots \\ U_s(t) - u(t) = L_s \cdot \sum_{k=1}^n i_k'(t) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)是一阶微分方程组，给定初值并设定积分步长就可以采用改进欧拉法进行求解出母线电压和各支路负荷电流的波形。

4 算例

本节利用两个算例验证了本文所提出的理论和算法的有效性。算例1对第二节分析的闪变原因进行了验证；算例2对第三节提出的闪变定位算法进行了验证。

4.1 算例1

假定图1所示的供电系统中，电源 U_s 为理想电源，其表达式为：

$$U_s(t) = U_m \sin(100\pi t) \quad (7)$$

负荷为电弧炉负荷，理论和实践分析表明，电弧炉负荷是各类功率波动负荷中对电压特性影响最大的负荷^[9]。此时，电弧炉负荷用一个时变电阻模拟。该非线性电阻含有频率为 ω_{r1} 的周期分量，其表达式为：

$$r_2(t) = R_2 [1 + \sin(2\pi\omega_{r1}t)] \quad (8)$$

经过仿真(积分步长为 0.001 s，仿真时间为 2 s)，该系统母线电压波形如图4所示。

由仿真结果可以看出，供电系统的 PCC 电压发生了闪变。此算例表明，负序参数的波动可以导致供电线路电压降的波动，从而使 PCC 电压闪变。

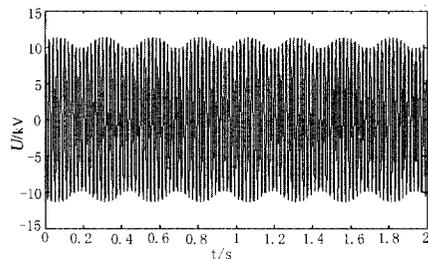


图4 算例1 母线电压

Fig.4 Bus voltage of example 1

4.2 算例2

为了验证闪变定位算法的有效性，本节建立了如图5所示的模拟供电系统，该系统母线上接有两个负荷。负荷1是一个恒阻抗负荷，负荷2是算例1中的电弧炉负荷。在电力系统中，高电压等级系统的等效阻抗比较小，因此其中的闪变分量大部分都能传递到低电压等级的供电系统。为了使算例更具有说服力，该供电系统电源 $U_s(t)$ 中含有频率为 ω_{r2} 的低频闪变分量，其表达式为：

$$U_s(t) = (U_m + \Delta U \sin(2\pi\omega_{r2}t)) \sin(100\pi t) \quad (9)$$

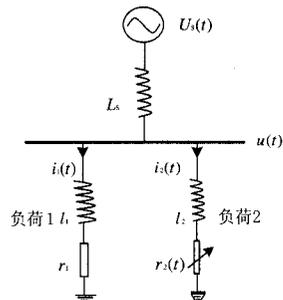


图5 算例系统示意图

Fig.5 Simple power system diagram

经过仿真(积分步长为 0.001 s，仿真时间为 2 s)，可得该供电系统母线电压 $u(t)$ (图6所示)和负荷电流 $i_1(t)$ ， $i_2(t)$ 。很显然，从仿真结果可以看出，此模拟系统母线上的电压发生了闪变。

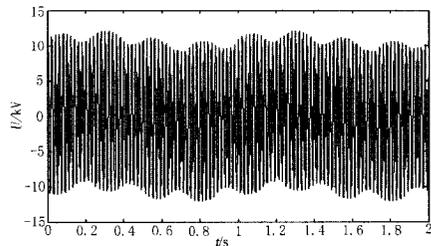


图6 算例2 母线电压

Fig.6 Bus voltage of example 2

为了定位系统中的闪变负荷，算例根据仿真所得的负荷1, 2的电压、电流的波形数据对负荷参数 $r(t)$ 、 $l(t)$ 进行了计算(实际系统中以电压、电流

的录波数据为计算依据),计算结果如图7~10所示。

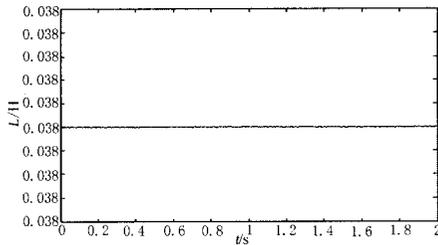


图7 负荷1的电感

Fig.7 Inductance of load

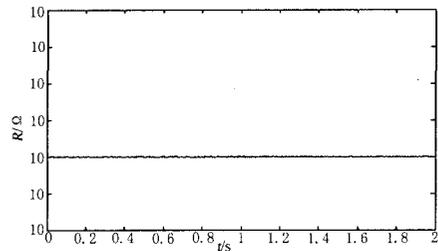


图8 负荷1的电阻

Fig.8 Resistance of load 1

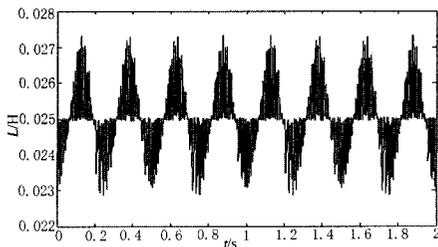


图9 负荷2的电感

Fig.9 Inductance of load 2

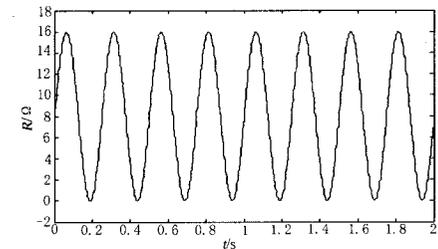


图10 负荷2的电阻

Fig.10 Resistance of load 2

从负荷参数计算结果可以看出:负荷1是一个恒阻抗负荷,其参数不发生波动;负荷2是一个波动性的负荷,其参数呈现出低频波动。正是该负荷参数的波动导致了母线电压 $u(t)$ 的波动,从而发生了闪变。负荷2就是闪变源,必须承担闪变责任(算例1已经验证了负荷2会导致闪变)。算例2表明本文提出的闪变定位算法可以快速有效地定位出系统中的闪变源,为解决电能质量问题提供有益的参考。

5 总结与展望

本文首先分析闪变发生的原因,认为波动性负荷参数的波动导致了电压闪变。接着本文建立了负荷的时变模型,并根据负荷的电压、电流录波数据识别负荷参数,进而定位出系统中的闪变源。但由于研究条件的限制,本文所取得的研究成果还很初步,需要借助专业的电磁暂态仿真软件(如EMTP)建立各种闪变模型,并对其阻抗参数进行分析,以进一步完善闪变源定位算法。

参考文献

- [1] 肖湘宁, 韩民晓, 徐永海, 等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. 95-99.
- [2] 赵刚, 施围, 林海雪. 闪变值计算方法的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 15-18.
ZHAO Gang, SHI Wei, LIN Hai-xue. A Study on Calculation of Short Term Flicker Severity[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 15-18.
- [3] 周兆经, 周文晖, 李青. 采用小波分解和同步检波的电压闪变信号检测新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(6): 23-27.
ZHOU Zhao-jing, ZHOU Wen-hui, LI Qing. A New Method for The Detection of Voltage Flicker Using Wavelet Transform and Synchronous Detection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2001, 13(6): 23-27.
- [4] 堵俊, 邵振国, 郭晓丽, 等. 用小波分析提取电压闪变的幅值调制信号[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(3): 34-37.
DU Jun, SHAO Zhen-guo, GUO Xiao-li, et al. Tracking the Envelope of Voltage Flicker Using Wavelet Analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(3): 34-37.
- [5] Abdel Galil T K, El-Saadany E F, Salama M M A. Online Tracking of Voltage Flicker Utilizing Energy Operator and Hilbert Transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 861-867.
- [6] Sakulin M, von Span Nungsenderungen Bzw E. Flicker Direkte Messung Mit Hilfe Der Differenzmethode[A]. In: Internationaler Workshop Oberschwingungen and Flicker[C]. Graz: 1995.
- [7] Dan A. Identification of Flicker Sources[A]. In: Proceedings on 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power[C]. Athens(Greece): 1998.
- [8] 胥国毅. 闪变源识别的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
XU Guo-yi. Identification of Flicker Source[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006.
- [9] 程浩忠, 艾芊, 张志刚, 等. 电能质量[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. 251-288.

收稿日期: 2008-04-09; 修回日期: 2008-07-16

作者简介:

堵俊(1958-), 男, 副教授, 从事电力系统方面的教学与科研工作; E-mail: nantongdujun@163.com

张新松(1980-), 男, 讲师, 从事电力系统方面的研究和教学;

郭晓丽(1971-), 女, 硕士, 副教授, 从事电力系统方面的研究和教学。