

# 波动负荷的闪变危害评估

邵振国<sup>1</sup>, 吴丹岳<sup>2,3</sup>, 林焱<sup>2</sup>

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 福建省电力试验研究院, 福建 福州 350007;  
3. 国家电网公司电能质量分析实验室, 福建 福州 350007)

**摘要:** 波动型负荷将引起供电电压的波动和闪变, 影响供电系统的电能质量。监测公共连接点电压闪变只能评估多个干扰负荷共同作用的结果, 并不能比较不同负荷的危害大小。干扰负荷对供电系统造成的干扰与负荷固有特性相关, 单独分析供电电压不可能评估负荷对供电系统的干扰强度, 也不能够从多个负荷中鉴别出闪变干扰的来源。从负荷波形数据提取波动的电压和电流幅值, 计算波动负荷的阻抗参数, 给出了平稳型波动负荷的闪变危害评估方法。

**关键词:** 电能质量; 闪变; 闪变干扰负荷; 危害评估

## Evaluating the flicker interference of fluctuating load

SHAO Zhen-guo<sup>1</sup>, WU Dan-yue<sup>2,3</sup>, LIN Yan<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Electric Power Test and Research Institute, Fuzhou 350007, China; 3. State Grid Power Quality Analysis Laboratory, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** Voltage flicker will interfere with the power quality in distribution system resulting from load fluctuation. The flicker intensity detected on PCC is the total effect of all loads putting in PCC, that can't help to evaluate the interference of single load. The flicker interference injecting into system is relevant to the operating character of load which puts up as the correlation of voltage and current. So, it can't locate the flicker source just according to the voltage analysis. An evaluation method is proposed in this paper, which tracks the load impedance in lower frequency and then computes the flicker intensity of PCC resulting from the only load. Its feasibility is verified with a simulation case.

**Key words:** power quality; flicker; interferring load; interference evaluation

中图分类号: TM93; TM714; TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)14-0036-05

## 0 引言

理想的供电电压应该是标准的工频(50 Hz)正弦信号, 但由于电网中存在非线性负荷, 使得供电电压含有谐波、闪变、电压跌落以及暂态过程等干扰信号。电能质量恶化给电网及用户带来巨大的经济损失, 主要包括电能损耗、设备损坏、对产品质量的影响等等。电压波动和闪变是供电系统中大量存在的电能质量问题, 造成了很大的危害<sup>[1]</sup>。

当大容量负荷的参数发生周期性的变化, 将会导致节点电压波动或闪变, 并在供电系统中传播, 影响其它负荷的正常运行。

作为电力商品的主要性能指标, 电能质量的重要性随着电力市场化的逐步深入而日益突出, 成为供、用电双方共同关注的问题。如何判别干扰的来源, 如何评估负荷对供电系统造成的闪变干扰强度, 是工程中需要解决的实际问题。本文通过分析平稳型波动负荷产生闪变干扰的一般过程, 给出了平稳型波动负荷的闪变危害评估方法。

## 1 闪变与干扰定位

电压波动定义为电压方均根值发生一系列的变动或连续的改变。它会影响到连接在公共连接点上的电器设备的正常运行, 引起照明设备的照度波动。这种灯光照度不稳定造成的视感即闪变<sup>[2]</sup>。

《电能质量电压波动和闪变 GB 12326-2000》规定了电压波动和闪变的限值及测试、计算和评估方法。相关的研究工作也多从电压信号分析入手,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50747043); 福建省科技计划重点项目 (2007H0022); 福州大学人才基金 (XRC-0656)

研究提取电压信号包络线以及计算短时间闪变值  $P_{st}$  和长时间闪变值  $P_{lt}$  的不同方法, 并以此作为电压闪变强度的度量<sup>[3~8]</sup>。然而, 单纯监测节点电压只能了解电压波动或闪变的严重程度, 并不能直接定量比较多个干扰负荷对系统的影响。

文献[9]把“负荷的闪变干扰”等同于“向网络注入低频的干扰功率”, 由此判断干扰来自于系统侧还是负荷侧。然而, 在复杂的多干扰源供电网络中, 线性负荷单纯消耗而不会注入干扰功率, 但干扰源却有可能吸收干扰功率<sup>[10,11]</sup>。因此, 用干扰功率流向定性分析闪变干扰来源存在误判或无法判别的可能。

文献[12~15]根据监测点的电压幅值与负荷电流幅值变化的相对关系判断闪变干扰的来源, 仍然只是背景干扰和负荷干扰的定性区分。文献[16]提出了闪变干扰负荷危害评估的初步思路, 是本文的前期工作。

## 2 负荷干扰的电路分析

如图1所示简单供电网络, 设  $U_s$  是等效的电压源, 等效阻抗  $Z_c = R + jX$ 。在公共连接点 PCC 上接有恒定负荷  $Z_1 = R_1 + jX_1$  和波动负荷  $Z_2 = R_2 + jX_2$ 。

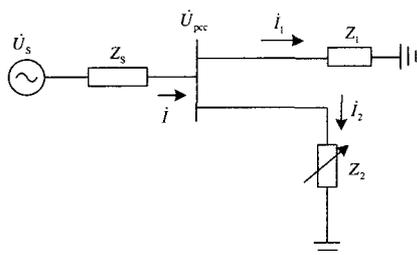


图1 简单供电网络

Fig.1 A simple distribution system

当不存在背景干扰时, 等效电压  $U_s$  恒定。如果同时也不存在干扰负荷, 那么公共连接点电压  $U_{pcc}$  不会出现波动。当系统同时给恒定负荷  $Z_1$  和波动负荷  $Z_2$  供电时, 线路电流  $I$  波动, 从而使得  $U_{pcc}$  出现波动现象。此时, 恒定负荷  $Z_1$  从系统吸收的电流  $I_1$  也是波动的。

因此, 当  $U_{pcc}$  波动时, 恒定负荷  $Z_1$  的运行电压和电流都是波动的, 单纯监测电压  $U_{pcc}$  或负荷电流尚不能区分产生干扰的来源, 也无法评估波动负荷对系统造成的干扰强度。

波动负荷和恒定负荷的差异可以作为闪变干扰源的定性鉴别依据。即使存在背景干扰, 通过跟踪监测负荷参数的变化也能够判别哪个是真正的干扰负荷。但对于多个干扰负荷而言, 还需要从数量上

比较其对系统造成的危害程度。

## 3 波动负荷参数的跟踪

由于人眼对照度波动的觉察频率为  $0.05 \sim 35$  Hz, 那么分析闪变干扰负荷就是主要研究负荷在这个频宽中的运行特性。设负荷运行电压  $u(t) = \sqrt{2} U(t) \cos(\omega t)$ , 负荷电流  $i(t) = \sqrt{2} I(t) \cos(\omega t - \phi(t))$ , 负荷参数可以用等效阻抗  $Z(t)$  来表示, 即  $Z(t) = U(t) / I(t)$ 。

闪变检测技术中已经包含了传统的电压调制信号检测方法, 比如基于 FFT 的平方检测法、整流检测法和有效值检测法<sup>[13]</sup>, 这些方法可以用来跟踪电力信号的有效值。但是, 由于闪变检测主要关注不同频率的幅值波动对人眼的影响, 因此这些检测方法不注重时域分辨率, 不适合用来捕捉间断或时变的调制信号。文献[4,5]采用小波分析提取闪变电压的包络线, 取得了比 FFT 更好的结果。然而, 当检测中采用的同步或拟同步信号与实际基波分量的频率存在偏差时会严重干扰闪变调制信号的检测。文献[6]基于周期小波变换直接对采样的电压信号进行平方解调, 提出了一种新的闪变电压包络线检测方法。这种方法也可以用来跟踪电力信号的有效值变化。

设电压  $u(t) = \sqrt{2} U(t) \cos(\omega t + \varphi_u)$ ,  $\omega$  是工频,  $U(t)$  是工频电压有效值,  $\varphi_u$  是工频电压的相位。那么

$$u^2(t) = 2U^2(t) \cos^2(\omega t + \varphi_u) = U^2(t) + U^2(t) \cos(2\omega t + 2\varphi_u)$$

用小波分解提取分量  $u^2(t)$  中的低频分量  $y_-(t)$ , 那么有  $U(t) = \sqrt{y_-(t)}$ 。

设负荷电流  $i(t) = \sqrt{2} I(t) \cos(\omega t + \varphi_i)$ , 那么瞬时视在功率  $s(t) = u(t) \cdot i(t) = P(t) + q(t)$ , 其中

$$P(t) = U(t) \cdot I(t) \cdot \cos(\varphi_u - \varphi_i)$$

$$Q(t) = U(t) \cdot I(t) \cdot \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i)$$

由于  $P(t)$  和  $q(t)$  占有不同的频宽, 也可以用小波分解进行分离。此后, 可以计算功率因数  $\cos(\varphi_u - \varphi_i) = P(t) / (U(t) \cdot I(t))$ , 负荷电阻  $R(t) = P(t) / I^2(t)$ , 负荷电抗  $X(t) = \sqrt{U^2(t) I^2(t) - P^2(t)} / I^2(t)$ 。

## 4 负荷干扰强度的评估

设系统电源为理想工频电压源  $u_s(t)$ , 公共连接点 PCC 处电压  $u(t)$ , 短路容量为  $S_d$ , 那么系统阻抗  $X_S = U_s^2 / S_d$ 。

存在闪变干扰的情况下，系统等效电压呈现低频的平稳型波动，且波动范围极小（在瞬时视感度  $S=1$  时，8.8 Hz 调幅波的电压波动值为 0.25%），因此负荷可以采用稳态的阻抗模型。

$$u(t) = u_s(t) - \frac{X_s}{\omega} \cdot i'(t) = u_s(t) - \frac{X_s}{\omega} \cdot \left( \sqrt{2}\omega I(t) \cdot \cos\left[\omega t - \phi + \frac{\pi}{2}\right] + \sqrt{2}I'(t) \cdot \cos[\omega t - \phi] \right)$$

写成相量表达式，

$$\dot{U}(t) = \dot{U}_s(t) - jX_s \cdot \dot{I}(t) - \left[ \frac{X_s}{\omega} \cdot I'(t) \right] \angle(-\phi)$$

按照闪变严重度的计算方法<sup>[17]</sup>，由  $U(t)$  可计算闪变严重度  $P$ 。在不存在背景干扰的前提下，计算值与 PCC 处的闪变检测值在理论上应该是相等的。

在存在多个负荷时，需要区分不同负荷对系统的干扰大小。假设负荷  $i$  单独接入，可由检测到的负荷电流计算假想的公共连接点电压  $\dot{U}_i(t)$ 。

$$\dot{U}_i(t) = \dot{U}_s(t) - jX_s \cdot \dot{I}_i(t) - \left[ \frac{X_s}{\omega} \cdot I'_i(t) \right] \angle(-\phi_i)$$

由  $U_i(t)$  计算的闪变严重度  $P^i$  与公共连接点的闪变检测值是不等的，它代表了负荷  $i$  单独接入时对系统造成的闪变污染强度。根据监测数据跟踪单个干扰负荷的阻抗参数，分别计算单个负荷造成的节点电压闪变严重程度，并以此作为危害指标比较多个干扰负荷的强弱。

### 5 算例

如图 2 所示的供电系统，系统通过三绕组变压器分别向 35 kV 的等效负荷  $Z_1$ 、10 kV 的等效负荷  $Z_2$  供电。系统侧短路容量 700 MVA。负荷  $Z_1$  是波动负荷，其恒定的有功功率为 5 MW，波动的有功功率是 800 kW，波动的周期是 0.08 s，其有功变化曲线如图 3 所示。负荷  $Z_2$  是 5 MW 的等效恒定负荷。

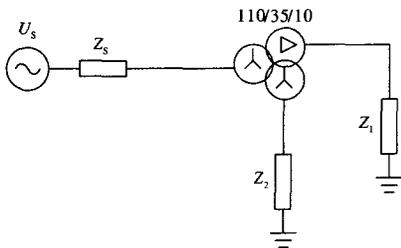


图 2 系统接线图  
Fig.2 System diagram

在 Simulink 建立仿真模型，得到负荷  $Z_1$  和  $Z_2$  三相运行电压、电流的采样序列，采样频率为 1 600 Hz。

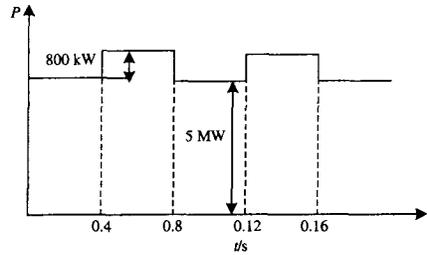


图 3 35 kV 侧波动负荷的有功变化曲线

Fig.3 Fluctuating active power of load

从录波数据跟踪得到 36 kV 和 10 kV 侧负荷相电压的有效值变化曲线，如图 4 和图 5 所示。

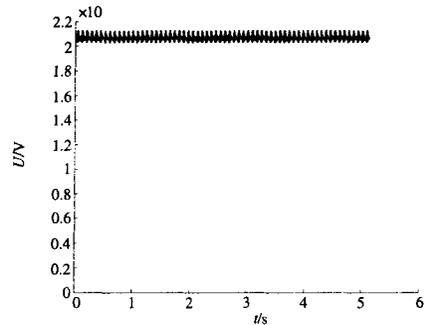


图 4 35 kV 侧负荷相电压有效值变化曲线

Fig.4 Fluctuating voltage RMS of 35 kV

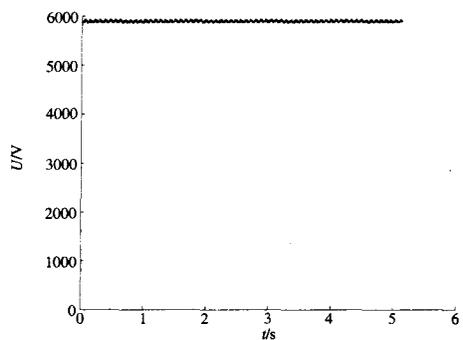


图 5 10 kV 侧负荷相电压有效值变化曲线

Fig.5 Fluctuating voltage RMS of 10 kV

可以看出，35 kV 和 10 kV 侧的电压都存在电压波动，能测量到 35 kV 侧的三相短时间电压闪变值分别为 2.764 4、1.827 9 和 2.383 7，10 kV 侧的三相短时间电压闪变值分别为 1.641 8、1.499 3 和 1.568 4。

为了进一步判断闪变干扰的来源，分别计算负荷参数。图 6 是 35 kV 侧负荷阻抗的变化曲线，图

7 是 10 kV 侧负荷阻抗的变化曲线。

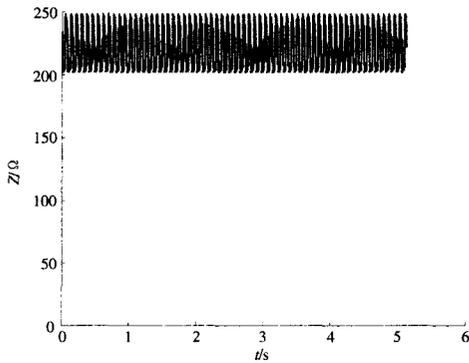


图 6 35 kV 侧负荷阻抗的变化曲线

Fig.6 Fluctuating load impedance of 35 kV

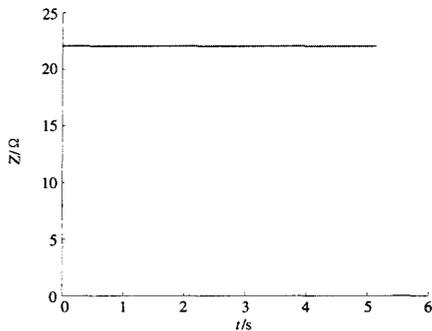


图 7 10 kV 侧负荷阻抗的变化曲线

Fig.7 Fluctuating load impedance of 10 kV

利用本文提出的闪变干扰负荷对系统危害的评估方法, 根据两个负荷的录波数据辨识其参数, 计算得到等效的短时间闪变值与测量值的比较如表 1 所示。其中, 10 kV 侧的  $S_d$  取 70 MVA, 35 kV 侧的  $S_d$  取 200 MVA。

表 1 闪变值测量值与负荷危害指标的比较

Tab.1 Comparison of Pst and evaluation index

	10 kV 侧		35 kV 侧	
	闪变测量值	A 相	1.641 8	A 相
	B 相	1.499 3	B 相	1.827 9
	C 相	1.568 4	C 相	2.383 7
危害指标	A 相	0.051 7	A 相	0.491 7
	B 相	0.047 0	B 相	0.509 5
	C 相	0.049 3	C 相	0.512 7

表 1 的比较表明, 虽然 10 kV 侧和 35 kV 侧都存在闪变干扰, 但两个负荷对系统的闪变干扰程度是不一样的。相比较而言, 35 kV 侧的负荷才是闪变干扰源。这和仿真模型中的设置是一致的。

## 6 结论

单独分析电压或电流信号的特征, 计算相应的指标, 只能评估供电系统在某一时间段的电能质量等级, 无法比较多个负荷对系统干扰的影响。电能质量指标可以作为是否需要治理的定性标志, 但单纯根据质量指标不可能制定合理的治理措施。只有把负荷电压和电流联系起来, 结合有效的信号分析以及数字仿真手段, 从分析负荷特性入手, 才能进一步揭示供电系统中的干扰主要是由哪一个或哪几个负荷引起的。本文通过跟踪负荷的阻抗变化来评估负荷的闪变干扰, 可以有效地找到系统中主要的闪变源。

在工程上, 以上鉴别工作的基本依据是现场运行的工况数据, 包括负荷电压和负荷电流。在给出不同电压等级侧的短路容量以后, 就可以在线监测负荷参数的波动状态, 进而通过计算定位指标来比较不同负荷对系统干扰的影响程度。

在实际短路容量无法确定的时候, 可以采用此电压等级下的基准短路容量。采用基准短路容量会改变定位指标的计算数值, 但不会影响同一电压等级多个负荷危害程度的大小关系。

## 参考文献

- [1] Lamedica R, Esposito G, Prudenzi A, et al. A Survey on Power Quality Cost in Industrial Customers[A]. in: Proc of IEEE PES Winter General Meeting[C]. Columbus(OH): 2001.
- [2] GB12326-2000, 电能质量电压波动和闪变[S]. GB12326-2000, Power Quality-Voltage Fluctuation and Flicker[S].
- [3] Chen Ming-Tang, Sakis Meliopoulos A P. Wavelet-based Algorithm for Voltage Flicker Analysis[A]. in: Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power Proceedings[C]. Florida(USA): 2000.732-738.
- [4] 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 EPSA, 2001, 13(6): 23-27.
- [5] 张宇辉, 陈晓东, 刘思革. 采用小波包分析和拟同步检波的电压闪变信号检测新方法[J]. 继电器, 2004, 32(3): 6-9.  
ZHANG Yu-hui, CHEN Xiao-dong, LIU Si-ge. Detection of Voltage Flicker Using Wavelet Package Analysis and Simulating Synchronous Detection[J]. Relay, 2004, 32(3):

- 6-9.
- [6] 堵俊, 邵振国, 郭晓丽. 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, 2005, 18(3): 34-37.  
DU Jun, SHAO Zhen-guo, GUO Xiao-li. Tracking the Envelope of Voltage Flicker Using Wavelet Analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2005, 18(3): 34-37.
- [7] 王志群, 朱守真, 周双喜. Hilbert 变换求取电压闪变有关参数[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 34-38.  
WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi. Parameter Estimation of Voltage Flicker through Hilbert Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 34-38.
- [8] 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.
- [9] Zhang D, Xu W, Nassif A. Flicker Source Identification by Interharmonic Power Direction[A].in: IEEE 18<sup>th</sup> Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering[C]. 2005: 2031-2034
- [10] XU Wil-sun, LIU Xian, LIU Yi-lu, An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination[J]. IEEE Trans on Power Deliver, 2003, 18(1).
- [11] 赵勇, 沈红, 李建华, 等. 谐波源的识别及其与非谐波源的分离方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 84-87.  
ZHAO Yong, SHEN Hong, LI Jian-hua, et al. Approach of Identification and Separation of Harmonics Sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 84-87.
- [12] Nassif A B, Nino E E, Xu W. A V-I Slope-Based Method for Flicker Source Detection[A].in: Power Symposium Proceedings of the 37th Annual American[C]. 2005.
- [13] Axelberg P G V. Measurement Methods for Calculation of the Direction to a Flicker Source, Thesis[D]. Goteborg (Sweden): Chalmers University of Technology, 2003.
- [14] Axelberg P G V, Bollen M H J. An Algorithm for Determining the Direction to a Ficker Source[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 755-760.
- [15] Axelberg P G V, Bollen M H J, Gu Irene Yu-Hua. Trace of Flicker Sources by Using the Quantity of Flicker Power[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(1): 465-471.
- [16] 邵振国, 朱少林, 张榕林. 闪变污染性负荷的阻抗分析法[A]. 第三届电能质量(国际)研讨会[C]. 三亚: 2006.  
SHAO Zhen-guo, ZHU Shao-lin, ZHANG Rong-lin. Operating Analysis of Flicker-type Contaminating Load[A]. in: The 3rd ICPQ[C]. Sanya: 2006.
- [17] 孙树勤. 电压波动与闪变[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.  
SUN Shu-qin. Voltage Fluctuation and Flicker[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

收稿日期: 2008-08-29; 修回日期: 2008-09-11

作者简介:

邵振国(1970-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电能质量及电力系统稳定与控制方面的研究与教学工作; E-mail: shao.zg@fzu.edu.cn

吴丹岳(1964-) 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电能质量技术监督、研究工作。

(上接第 20 页 continued from page 20)

- [18] Gözel T, Eminoglu U, Hocaoglu M H. A Tool for Voltage Stability and Optimization (VS&OP) in Radial Distribution Systems Using Matlab Graphical User Interface (GUI) [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2008,(16): 505-518.

收稿日期: 2008-09-02; 修回日期: 2008-10-24

作者简介:

汪兴旺(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与计算; E-mail: sinowon@163.com

邱晓燕(1964-), 女, 博士, 教授, 主要从事电力系统稳定性分析与控制方面的研究。