

# 电压波动和闪变的检测与控制方法

郭上华, 黄纯, 王磊, 曹国剑

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 冲击性功率负荷引起的电压波动与闪变是电能质量问题的重要方面之一。论述了电压波动和闪变的常用检测方法, 比较分析了几种改善电压波动和闪变补偿装置的性能特点, 为电力系统电压波动与闪变的监测及抑制提供了参考。

**关键词:** 电能质量; 电压波动; 闪变; 检测; 抑制

**中图分类号:** TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)03-0045-04

## 0 引言

随着大量的基于计算机系统的控制设备和自动化程度很高的用电设备相继投入使用, 工业用户对电能质量的要求越来越高, 甚至几分之一秒的不正常就可造成巨大的损失。据统计, 自动化程度很高的工业用户一般每年要遭受 10~50 次与电能质量问题有关的干扰, 其中因包括电压波动和闪变在内的动态电压质量问题造成的事故数约占事故总数的 83%<sup>[1]</sup>。电压波动和闪变已成为威胁许多重要用户供电可靠性的主要原因之一, 必须对其进行有效的监视与抑制。

电力系统的电压波动和闪变主要是由具有冲击性功率的负荷引起的<sup>[2]</sup>, 如变频调速装置、炼钢电弧炉、电气化铁路和轧钢机等。这些非线性、不平衡冲击性负荷在生产过程中有功和无功功率随机地或周期性地大幅度变动, 当其波动电流流过供电线路阻抗时产生变动的压降, 导致同一电网上其它用户电压以相同的频率波动。这种电压幅值在一定范围内(通常为额定值的 90%~110%)有规律或随机地变化, 即称为电压波动。电压波动通常会引起许多电工设备不能正常工作, 如影响电视画面质量、使电动机转速脉动、使电子仪器工作失常、使白炽灯光发生闪烁等等。由于一般用电设备对电压波动的敏感度远低于白炽灯, 为此, 选择人对白炽灯照度波动的主观视感, 即“闪变”, 作为衡量电压波动危害程度的评价指标。

## 1 电压波动与闪变的检测

### 1.1 调幅波检测

要对电压波动与闪变进行有效的抑制, 首要的任务就是要准确地提取出波动信号, 通常将波动电

压看成以工频额定电压为载波, 其电压的幅值受频率范围在 0.05~35 Hz 的电压波动分量调制的调幅波。因此, 电压波动分量的检出方法可采用通信理论中大功率载波调制信号解调方法, 用与载波信号同频同相的周期信号乘以被调信号, 将电压波动分量与工频载波电压分离, 通过带通滤波器得到波动分量。

考虑电压波动分量, 就是在基波电压上叠加一系列的调幅波, 为使分析简化又不失一般性, 研究电压波动的检测方法可分析某单一频率的调幅波对工频载波的调制, 将工频电压  $u(t)$  的瞬时值解析式写成:

$$u(t) = A(1 + m\cos(\omega_m t))\cos(\omega_0 t)$$

式中:  $A$  为工频载波电压的幅值;  $\omega_0$  为工频载波电压的角频率;  $m$  为调幅波电压的幅值;  $m\cos(\omega_m t)$  为波动电压。

目前, 常用的波动电压检出方法有三种: 平方解调检波法、全波整流检波法和半波有效值检波法, 图 1 所示分别为三种方法的原理结构框图。

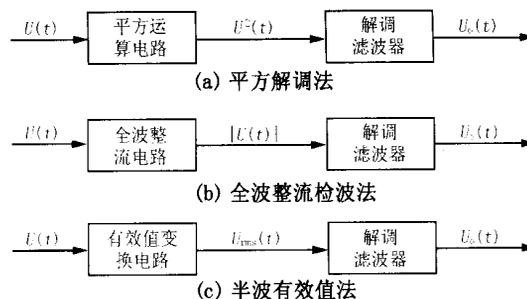


图 1 波动电压检出单元结构框图

Fig. 1 Structure diagram of detected fluctuation voltage

### (1) 平方解调检波法

国际电工委员会(IEC)推荐平方解调检测法, 即将  $u(t)$  平方, 然后利用解调带通滤波器检测出调幅

波。经过 0.05 ~ 30 Hz 的带通滤波器便能滤去直流分量和二倍工频分量,从而检测出  $mA^2 \cos(\omega t)$  的调幅波即电压波动分量。这种方法较适合用数字信号处理的方法来实现。

### (2) 全波整流解调检波法

全波整流检波法的基本原理是将输入交流电压  $u(t)$  全波整流即进行绝对值运算后再经过解调带通滤波器后便取得波动信号。设  $u(t)$  经整流后的电压为  $g(t)$ , 则  $g(t)$  可看作  $u(t)$  和幅值为  $\pm 1$ 、频率为工频的方波  $p(t)$  的乘积。将  $g(t)$  经过 0.05 ~ 30 Hz 的带通滤波器便可检测出  $2mA \cos \omega t$  的调幅波即电压波动分量。

这种方法较适合于模拟电路加以实现,英国 ERA 和法国 EDF 等闪变仪采用此方案。它跟平方检波法一样,都要通过带通滤波器保留调幅波,但存在检出误差,误差的大小取决于波动信号的频谱结构。

### (3) 半波有效值检波法

半波有效值法是利用 RMS/DC 变换器将波动的输入交流电压变换成脉动的直流电压,再经解调带通滤波器后获得波动信号。RMS/DC 变换器输出的直流电压值为输入交流电压的方均根值,其脉动成份即反映了输入电压方均根值的变化。根据半波有效值定义  $U(\omega) = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/4} u^2(t) dt}$ , 将电压  $u(t)$

乘方减去相当于平均值的参考电压  $U_0 = A^2/2$  取积分,一般来说,大于等于  $2U_0$  的分量在工频一周期的积分值几乎为零,便有  $k(\omega) = \frac{2 - 0mA^2}{2} \sin(\frac{\omega}{\omega_0}) \cos(\omega t)$ 。将  $K(\omega)$  加以适当放大和补偿便可得到待测的调幅波。

这种方法,就实际线路而言,要将方均根值的计算时间准确地整定在半个工频周期是相当困难的,而且其元件参数整定较为困难。另外,该方法可去除直流分量和二倍工频分量等,只保留调幅波,但其中不会完全没有直流分量,仍需隔直和滤波。瑞士的 MEFP 型闪变仪,国产的 VFF-1 型电压波动闪变分析仪和日本的 V10 测量仪等均采用每个周波求一个有效值。

### (4) 小波多分辨率信号分解同步检波法及其它方法

近年来一些新理论和新原理应用于调幅波检测。如文献[3]提出了一种采用小波多分辨率信号

分解和同步检波的电压闪变信号检测新方法,该方法用小波多分辨率信号分解滤波器取代同步检波器中的解调带通滤波器,可以检测出电压闪变信号的突变时间,包络信号中的各个频率分量及其幅度。但这种方法具有对信号所需采样数据多,运算量大,检测突变故障信号的故障时刻延时较长等特点,因而在采用小波多分辨率信号分解时,必须寻求快速小波函数及其相应小波变换。

另外,文献[4]提出了一种基于随机理论和导纳矩阵的随机电压闪变功率潮流法,这种方法可以计算出每条母线的最大电压波动值和闪变值,也能检测出闪变源对系统电压的冲击,但这种方法在实际应用中存在很大的难度。

## 1.2 闪变值的获得

闪变是由于电网电压的波动,所引起的灯光闪烁对人眼视觉产生刺激的响应。它不仅和电压波动大小有关,而且和波动的频率(即对工频电压的调幅频率)、照明灯具的性能及人的视感因素有关。因此,要获得闪变值,就必须在取得电压波动信号  $m \cos(\omega t)$  的基础上,根据人眼视感度曲线进行相应的处理。国际电工委员会(IEC)依据 1982 年国际电热协会(UIE)的推荐,给出了检测电压闪变的设计规范,其框图如图 2 所示。

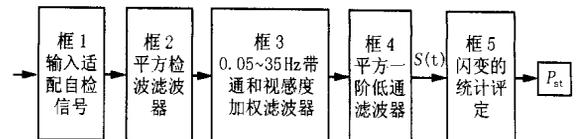


图 2 IEC 推荐的闪变测试仪框图

Fig. 2 Diagram of flicker measurement instrument recommended by IEC

框 1 为输入级,实现把不同等级的电源电压降到适合于仪器内部电路的电压值,此外也能产生标准的调制波用于仪器的自检。框 2、3、4 综合模拟了灯-眼-脑环节对电压波动的反应。其中框 2 反映灯光强度与电压的关系,给出与调制波幅值成线性关系的电压,具体参考前面调幅波的检测;框 3 的带通和视感度加权滤波器反映了人眼对不同频率的电压波动的敏感程度,通频带为 0.05 ~ 35 Hz;框 4 包含一个平方器和一个一阶低通滤波器,用来模拟人脑对光强变化的非线性响应和存储响应,框 4 的输出  $S(t)$  反应了人的视觉对电压波动的瞬时闪变视感度。然后对  $S(t)$  作不同处理可以反映电网电压的闪变情况<sup>[5,6]</sup>;框 5 为闪变的统计分析,即根据框 4 输出的  $S(t)$  进行在线统计分析或将其输出滤波

做离线统计分析求得并输出短时闪变严重度  $P_{st}$ 。

根据此原理和框图,可以设计出模拟式闪变检测仪和数字式闪变检测仪。模拟式闪变仪由于采用芯片实现滤波电路,具有处理速度快等特点,但对硬件电路要求较高,设计复杂;数字式检测仪滤波运算采用软件实现,计算量大,但结构简单,比较灵活。

## 2 电压波动与闪变的抑制

目前,大部分用于改善和提高电能质量的补偿装置,它们也都具有抑制电压波动与闪变的功能<sup>[6~9]</sup>,如静止无功补偿器(SVC),有源滤波器(APF),动态电压恢复器(DVR),以及配电系统电能质量统一控制器等。下面分析比较这些装置在抑制电压波动与闪变方面的作用。

### 2.1 静止无功补偿器(SVC)

电压闪变是电压波动的一种特殊反映,闪变的严重程度必将与负荷变化引起的电压变动相关,电压变动量通常按下式计算:

$$U\% = (P \cdot R + Q \cdot X) / U_N^2 \cdot 100\% \quad (1)$$

式(1)中,  $P$ 、 $Q$  分别为评价母线上电力负荷有功、无功变化量;  $R$ 、 $X$  为从电源到评价母线段供电系统等值电阻和电抗;  $U_N$  为评价母线额定电压。在 10 kV 以上系统中,由于  $R$  远小于  $X$ ,故有:

$$U\% \approx Q \cdot X / U_N^2 \cdot 100\% = Q / S_K \cdot 100\% \quad (2)$$

式(2)中,  $S_K$  为评价母线上的三相系统短路容量。

式(2)表明,在高压或中压配电网中,电压波动主要与无功负荷的变化量以及电网的短路容量有关。在电网短路容量一定的情况下,电压闪变主要是由于无功负荷的剧烈变动所致,因此对于电压闪变的抑制,最常用方法是安装静止无功补偿装置(SVC),目前这方面技术已相当成熟。但是,由于某些类型的 SVC 本身还产生低次谐波电流,须与无源滤波器并联使用,实际运行时有可能由于系统谐波谐振使某些谐波严重放大。因此,在进行补偿时,要求采用具有短的响应时间、并且能够直接补偿负荷的无功冲击电流和谐波电流的补偿器。

### 2.2 有源电力滤波器(APF)

对于非线性冲击性负荷,在几个周波的时间内,其电流可能出现相当大的波动,引起电压闪变。因此,要抑制电压闪变,必须在负荷电流急剧波动的情况下,跟随负荷变化实时补偿无功电流。近年来采用电力晶体管(GTR)和可关断晶闸管(GTO)及脉宽调制(PWM)技术等构成的有源滤波器,可对负荷电流作实时补偿,如图 3 所示。有源电力滤波器的工

作原理与传统的 SVC 完全不同,它采用可关断的电力电子器件和基于坐标变换原理的瞬时无功理论进行控制,其作用原理是利用电力电子控制器代替系统电源向负荷提供所需的畸变电流,从而保证系统只须向负荷提供正弦的基波电流。

有源电力滤波器与普通 SVC 相比<sup>[10]</sup>,有以下优点:响应时间快,对电压波动、闪变补偿率高,可减少补偿容量;没有谐波放大作用和谐振问题,运行稳定;控制强,能实现控制电压波动、闪变,稳定电压作用,同时也能有效地滤除高次谐波,补偿功率因数。

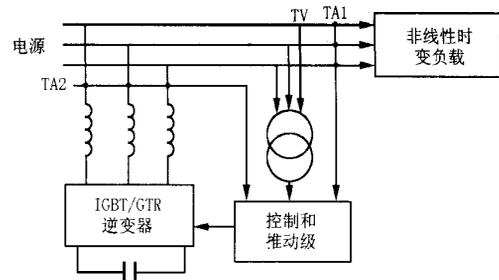


图 3 有源滤波器结构

Fig. 3 Structure of active power filter

我国虽然在理论上取得了一定的进展,但由于多方面条件的限制,至今未有并联型有源电力滤波器正式用于实际。而在日本和美国,已普遍使用有源电力滤波器来抑制电弧炉等引起的电压闪变。

### 2.3 动态电压恢复器

由式(1)知,在中低压配电网中,由于  $R$  与  $X$  相差不大,有功功率的快速波动同样会导致电压闪变,这就要求补偿装置在抑制电压波动与闪变时除了进行无功功率补偿使供电线路无功功率波动减小外,还得提供瞬时有功功率补偿。因而传统的无功补偿方法不能有效地改善这类电能质量问题,只有带储能单元的补偿装置才能满足要求。

动态电压恢复器(DVR)的基本结构如图 4 所示,其接法是将一个由三单相电压源变流器构成的三相变流器串联接入电网与欲补偿的负荷之间<sup>[11~13]</sup>。这里逆变器采用 3 个单相结构,目的是为了更灵活地对三相电压和电流进行控制,并提供对系统电压不对称情况的补偿。该装置的核心部分为同步电压源逆变器,当线路侧电压发生突变时,DVR 通过对直流侧电源的逆变产生交流电压,再通过变压器与原电网电压相串联,来补偿系统电压的跌落或抵消系统电压的浪涌。由于 DVR 通过自身的储能单元,能够在毫秒级内向系统注入正常电压与故障电压之差<sup>[2]</sup>,可用于克服系统电压波动对用户的

影响,因此是解决电压波动、不对称、谐波等动态电压质量问题的有效工具。至今西屋公司、西门子公司和 ABB 公司都已研制出该类装置,并已取得良好的运行效果<sup>[10]</sup>。

由 DVR 装置的结构图可以看出,它起了将系统与负荷隔离的作用,是面向负荷的补偿装置。该装置仅对特定负荷加以补偿,所以其容量仅取决于负荷的补偿容量和要求的补偿范围。目前大部分 DVR 装置的直流侧采用电容来提供直流电压,只能提供有限的能量,若要求 DVR 长时间提供电压补偿,则必须让 DVR 输出的电压和电流垂直,这样 DVR 装置不提供有功,只进行无功交换,可以满足长期工作的要求。

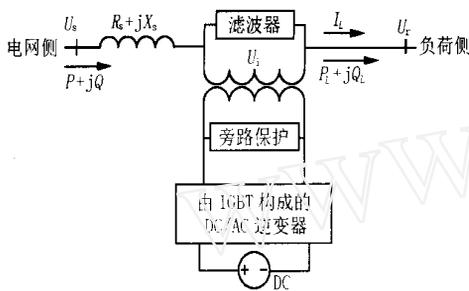


图4 动态电压恢复器装置的结构

Fig.4 Structure of dynamic voltage restorer (DVR)

## 2.4 统一电能质量控制器及其它补偿装置

统一电能质量控制器(UPFC)结合了串、并联补偿装置的特点,具有对电压、电流质量问题统一补偿的功能,属于综合的补偿装置。如文献[14]提出的含有储能单元的串、并联组合的用户电力综合补偿装置,该装置除了应用于配电系统的谐波补偿外,还可以解决瞬时供电中断和电压波动等动态电压质量问题,提高供电的可靠性。

另外,除了前面所介绍的补偿装置外,灵活交流输电系统(FACTS)也能抑制电压波动和闪变。该系统通过控制电力系统的基本参数来灵活控制系统潮流,使输送容量更接近线路的热稳极限,能提高输电系统输送容量。目前主要的FACTS有:静止无功补偿器(STATCOM),晶闸管投切电容器型(TSSC),可控串联补偿电容器(TCSC)等。根据前面的式(2)知,在10 kV以上系统中,通过FACTS改变线路电抗能减小电压波动,特别是并联补偿装置——STATCOM,通过与系统进行无功功率交换,以维持线路电压恒定,因此是抑制系统电压波动、闪变和提高系统稳定性特别是电压稳定性的有力工具。

## 3 结论

在输电和配电系统中,由冲击性功率负荷引起的电压波动通过公共连接点(PCC)传递到电网其它馈电线路危害其他用户的电气设备,给配电系统的电能质量造成了严重污染。因此,需加强对电压波动和闪变的监测与控制。本文论述了电压波动和闪变的常用检测方法,比较分析了常用的改善电压波动和闪变的补偿装置性能特点。这些研究,对研制闪变检测仪器或采取电压波动抑制措施,具有借鉴和参考价值。

## 参考文献:

- [1] Taylor G A, Burden A B. Wide Area Power Quality——Decision Processes and Options for Sensitive Users [M]. CIRED97, 1997, 2-5.
- [2] Montanari G C, Loggini M, Cavallini A, Pitti L, Zaninelli D. Arc Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(4): 2026-2036.
- [3] 周兆经, 周文晖, 李青 (ZHOU Zhao-jing, ZHOU Wen-hui, LI Qing). 采用小波分解和同步检波的电压闪变信号检测新方法 (A New Method for the Detection of Voltage Flicker Using Wavelet Transform and Synchronous Detection) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the EPSA), 2001, 13(6): 23-27.
- [4] HONG Ying-yi, LEE Lurr-hui. Stochastic Voltage-flicker Power Flow [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 407-411.
- [5] Keppler T, Watson N, Arrillaga J. Computation of the Short-term Flicker Severity Index [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(4): 1110-1115.
- [6] 孙树勤 (SUN Shu-qin). 电压波动与闪变 (Voltage Fluctuation and Flicker) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 1998.
- [7] 严干贵, 姜齐荣, 梁旭, 等 (YAN Gan-gui, JIANG Qi-rong, LIANG Xu, et al). 电能质量控制方法 (Resolutions for Resolving Power Quality) [A]. 高等学校电力系统及其自动化专业第十六届学术年会论文集 (Proceedings of 16th CUS-EPSA). 吉林 (Jilin): 2000. 791-798.
- [8] 林海雪 (LIN Hai-xue). 现代电能质量的基本问题 (Main Problems of Modern Power Quality) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2001, 25(10): 5-12.

(下转第70页 continued on page 70)

### 3 结论

多抽头 TA 在电力系统中应用非常普遍,使用时有以下几点需要注意:

- (1) 设计时要对型号仔细阅读,判断是属于多抽头 TA 还是多绕组 TA,二次图设计体现 TA 的接法;
- (2) 施工前对 TA 要作试验,确定它的变比、极性等;

(3) 现场接线按照图纸、实际铭牌进行确认变比、极性,如是多抽头 TA,不用的端子禁止短接;

(4) 一定要作短路(升流)试验六角图,以判断接线的完整性。

收稿日期: 2003-03-17; 修回日期: 2003-05-22

作者简介:

唐海平(1964 - ),男,硕士,从事电力系统继电保护工作。

### Application of the multi-terminal current transformer

TANG Hai - ping

(Xiamen Huaxia International Power Development Co. ,Ltd , Xiamen 361026 , China)

**Abstract:** Multi-terminal current transformer is a very important primary element in the system of vast grid, big machine and large user. Songyu power plant adopts 2 ×300MW coal-machine that utilizes single generator-transformer to connect to 220kV system. Its transformer differential protection makes use of the multi-terminal current transformer. This paper analyzes theoretically abnormal phenomena in debugging. Experimental results show that the application and popularization of multi-terminal current transformer are necessary.

**Key words:** differential protection; multi-terminal current transformer; vector

(上接第 48 页 continued from page 48)

- [9] 苏德良,孙会(SU De-liang, SUN Hui). 大容量电弧炉对电网干扰的抑制方法研究(Measures to Reduce Impact of Arc Furnace on Power Quality)[J]. 电网技术(Power System Technology), 2001, 25(9): 64-66.
- [10] Bhim Singh, Kamal Al - Haddad, Ambrish Chandra. A Review of Active Filters for Power Quality Improvement[J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 1999, 46(5): 960-971.
- [11] Choi S S, Li B H, Vilathgamuwa D M. Dynamic Voltage Restoration with Minimum Energy Injection[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 51-57.
- [12] 谢旭,胡明亮,梁旭,等(XIE Xu, HU Ming-liang, LIANG Xu, et al). 动态电压恢复器的补偿特性与控制目标(Compensation Range and Control Object of Dynamic Voltage Restorer)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(8): 41-44.

[13] Woodley N H, Morgan L, Sundaram A. Experience with an Inverter-based Dynamic Voltage Restorer[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 1181-1186.

[14] WONG Marr chung, ZHAN Chang-jiang, HAN Ying-duo. A Unified Approach for Distribution System Conditioning: Distribution System Unified Conditioner[A]. IEEE 2000 MW, Singapore: 2000.

收稿日期: 2003-02-21; 修回日期: 2003-04-11

作者简介:

郭上华(1978 - ),男,硕士研究生,从事电力电子在电力系统中的应用,电能质量检测与抑制等方面的研究工作;

黄纯(1966 - ),男,博士,副教授,从事电力系统自动化、电能质量分析与控制、微机保护等方面的教学与科研工作。

### Detection and suppression methods for voltage fluctuation and flicker

GUO Shang-hua, HUANG Chun, WANG Lei, CAO Guo-jian

(College of Electricity & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Voltage fluctuation and flicker, caused by high speed varying load, is one of the most important aspects of power quality. In view of that, the general methods of detecting voltage fluctuation and flicker are presented, and the performances of some developed devices that suppressed the voltage fluctuation are analyzed and compared. All the studies are helpful for the supervision and control of voltage fluctuation and flicker.

**Key words:** power quality; voltage fluctuation; flicker; detection; suppression