

直流配电系统闪变检测方法研究

苏 灿¹, 周 文¹, 胡雪凯¹, 闫 鹏¹, 孟 良¹, 刘军成²

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 石家庄 050000; 2. 西安博宇电气有限公司, 西安 710065)

摘要: 与交流配电系统一样,表征直流配电系统特征指标的直流电压、直流电流也在时刻变化着且其变化幅度、变化频度均具有很强的随机性,导致接入电网的照明类负载灯光照度的随机变化,引起感受体——人对照度变化的视感即常说的闪变。相比于交流配电系统已有公认的、标准化的闪变测量方法,直流配电系统的闪变测量方法目前还处于研究探讨之中。文中基于直流配电系统的特点,在分析传统交流配电系统平方解调闪变测量方法的基础上提出了一种适用于直流配电系统的去平方解调闪变测量方法;仿真分析表明:该方法准确度高,在较宽的闪变变化范围内误差在可接受的范围内,大大优于传统的基于平方解调的闪变测量方法。

关键词: 直流配电; 灯; 照度; 闪变; 检测方法

Study on Flicker Detection Measurement Method of DC Distribution System

SU Can¹, ZHOU Wen¹, HU Xuekai¹, YAN Peng¹, MENG Liang¹, LIU Juncheng²

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050000, China; 2. Xi'an Boyu Electrical Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: As same as AC distribution system, the DC voltage and DC current characterizing feature of DC distribution system is changing instantaneously in random in terms of fluctuation magnitude and frequency, making variation of illuminance of lights connected to DC network, leading to human being impression of unsteadiness of visual sensation induced by a light stimulus, namely flicker. Comparing with the recognized and standardized flicker measurement method of AC distribution system, the flicker measurement method for DC distribution system is still under development and discussion. In this paper, a new method called non-squaring-demodulation method applicable for DC distribution system is proposed on the basis of the feature of DC distribution system and the traditional squaring-demodulation flicker measurement method defined in AC distribution system. The simulation analysis shows that the method is high in accuracy, the error within the wide flicker variation range is within the acceptable range, which is greatly superior to traditional square demodulation method.

Key words: DC distribution system; lamp; illumination; flicker; measurement method

0 引言

近年来,直流配电系统引起了世界各国的普遍关注^[1-8]。直流配电的重视与发展与电力系统源、网、荷电气特性的深刻变革及全社会对能源利用效率的普遍重视有关。首先在电源方面,分布式新能

源建设快速发展;负荷层面,电动汽车等各类直流负载发展迅猛。在此背景下,继续沿用现有交流电能的传输模式,光伏发电等直流电源需要转换为交流电传输,送达终端后又需要将交流电变换为直流电供负载使用,两次交直流转换的中间过程消耗大量电能;另外,相比较于交流配电,直流配电具有更

收稿日期:2024-05-06; 修回日期:2024-07-29

基金项目:国网河北能源技术服务有限公司科技项目(面向雄安新区低压直流配电网电能质量测试技术研究及装置研制)。

Project Supported by Science and Technology Project of the State Grid Hebei Energy Technology Service Co., Ltd.(Research on Power Quality Testing Technology and Device Development for Low Voltage DC Distribution Network in Xiong'an New Area).

灵活的可控性、更友好的新能源接入方式、更高的能源传输效率、更高的电能质量等特点^[9-13]。

目前在运及在建的直流配电系统既有单极系统也有双极系统,其接地方式既有TN型式也有IT型式。这些直流配电系统大量应用于数据中心、充(换)电站、楼宇供电、航空船舶供电等领域;区域直流配电系统及直流微电网也广泛应用,例如苏州同里直流配电工程^[14]。与交流配电系统一样,表征直流配电系统特征指标的直流电压、直流电流也在时刻变化着且可能超出设定的容忍度范围,因而直流配电系统也同样存在电能质量问题^[14-19],也存在电压偏差、纹波、快速电压变化、闪变、电压暂降/暂升和短时中断等电能质量现象。文中着重针对直流配电系统的闪变测量方法开展研究。

众所周知,闪变是灯光照度不稳定造成的视感^[20],闪变现象不仅对人体健康有着重大影响,包括诱发偏头疼、其他精神性疾病、生活不适等^[18],同时良好的闪变控制有利于改善电压变化特征^[21],抑制电压暂降/暂升深度,因此有必要开展直流配电系统闪变及其测量方法的研究,为直流配电系统的健康发展提供技术支持。

目前关于直流配电系统闪变测量的方法还处于探索研究阶段,相关成果鲜有报道。文[18]从LED照度变化的角度开展了闪变现象的研究,但是这里的闪变指LED的照度变化,没有从电能质量角度基于闪变现象开展系统性地定量分析研究;2021年6月欧洲也启动了包括闪变测量在内的直流配电网电能质量测量标准化项目,该项目持续36个月,还未见有公开的报告。目前,IEC也未见直流配电系统闪变测量方法的相关标准。可以说,直流配电系统闪变测量方法的研究目前仍是空白。

与交流配电系统一样,闪变的测量离不开“灯—眼—脑”这一传递函数^[22],尽管交流配电系统中广泛应用各类灯具例如白炽灯、日光灯、LED等,但是国际电热委员会(UIE)却是基于60 W、230 V白炽灯通过实验数据拟合规定了该传递函数^[23-24]。其原因在于一般来说,日光灯、电视机等家用电气对电压波动的敏感程度远低于白炽灯,若电压波动不至于引起白炽灯闪变,则肯定不会引起其他家用电器工作异常^[24]。因此,对于直流配电系统,文中仍以白炽灯为对象开展直流配电系统闪变的测量方法研究。

文中首先分析了引起直流配电系统灯光照度变化的主要原因,提出了适用于直流配电系统的灯光照度描述指标;之后结合直流配电系统的特点,在分析交流配电系统闪变测量方法对直流配电系

统适用性的基础上,提出了适用于直流配电系统的去平方闪变测量方法;最后进行了算例分析验证。

必须指出的是:研究直流配电系统的电能质量离不开交流配电系统电能质量的基本概念,实际上直流系统本就是频率为零的交流系统。

1 直流电压波动与照度变化

我们知道,光通量(luminous flux)近似与其流过的电流成正比^[18],该电流与其供电电压成正比。因此,白炽灯的照度变化幅度、频度由其供电的电压波动特征决定。

所谓电压波动即连续的电压变化^[23]。一般来说,产生直流配电系统电压波动的原因主要有3类:①电源或负荷功率的波动导致线路电压波动^[22,25],其波动幅度、频度由功率波动特征决定。这点与交流系统类似;②控制回路干扰导致的主回路电压震荡,或控制策略导致的直流母线电压波动^[26-27];③纹波,其幅值和频度由各类变流器的开关特性确定;④不平衡的交流系统通过AC/DC变换器连接到直流配电系统,将会导致2倍工频的波动^[28]。可见:直流电压波动可能为周期性调制波例如纹波,也可能为幅值及频度随机变化的不规则波动信号,或上述两种波动信号的合成。

设直流供电电压波动为 $f(t)$,则直流电压可用式(1)表示

$$E = [1 + f(t)]E_{DC} \quad (1)$$

式(1)中: E 为直流供电电压; E_{DC} 为直流额定电压; $f(t)$ 为调制波。

考虑到任何形状的 $f(t)$ 均可看作是一系列频谱分量的合成,为使研究简化又不失一般性,选择幅值为 m 、角频率为 Ω 的单一正弦调制波进行研究。则式(1)简化为式(2)

$$E = E_{DC} + m \cdot E_{DC} \cos(\Omega \cdot t) \quad (2)$$

式(2)中,第二项 $m \cdot E_{DC} \cdot \cos(\Omega \cdot t)$ 恰好代表了直流电压的脉动,该脉动引起了直流电压的变化进而引起灯光照度变化,产生闪变。

观察式(2)可见其脉动信号即直流纹波,因此可以用纹波来衡量直流配电系统中灯光照度的变化。IEC 61000-4-17:2009^[29]指出:纹波大小可用直流脉动的峰谷差进行衡量,见式(3)

$$\alpha = \frac{U_{PP}}{U_{av}} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中: α 为纹波系数; U_{PP} 为谷峰电压差; U_{av} 为平均电压。

可见,纹波系数直接反映了灯光照度的变化,是最直接的衡量照度变化的量化指标。这也是许多发光设备驱动电路增加纹波滤除措施的主要原因^[30]。

2 直流配电系统闪变测量方法研究

闪变是灯光照度不稳定造成的视感^[23]。既然是视感就不仅与照度变化的强度有关,同时也与照度变化的频度有关,因此前述照度的变化衡量指标还不足以衡量这种视感(缺少频度的影响因素)。本节将基于直流配电系统的特点研究直流配电系统闪变的测量方法。

2.1 交流系统闪变及其测量方法回顾

交流配电系统闪变的测量方法是由 IEC 61000-4-15:2010^[20]规定的。该标准规定的闪变测量方法见图1。其中框2对输入信号进行平方解调,得到电压的波动信号。框3包含两部分,其一为0.05~35 Hz的带通滤波,由1阶高通滤波和6阶巴特沃斯低通滤波器实现(截止频率0.05、35 Hz信号均衰减到3 dB);其二采用加权滤波的方法获得不同频度电压波动对闪变的贡献量化水平,得到其综合闪变贡献量化水平,其传递函数见式(4)、表1。框4模拟人眼对灯光照度变化的感知过程,分为两部分,其一采用对信号平方的方法模拟眼—脑(eye-brain)的非线性感知过程,其二采用时间常数为300 ms的一阶低通滤波(电阻、电容)模拟对所感知的灯光照度变化的记忆过程,得到瞬时闪变 $S(t)$ 。框5:瞬时闪变与电压波动成非线性关系^[31],因此,需要按照 IEC 61000-4-15:2010 给定的统计方法,对瞬时闪变进行10 min统计计算,得到短时闪变 P_{st} 。

$$F(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \times \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)} \quad (4)$$

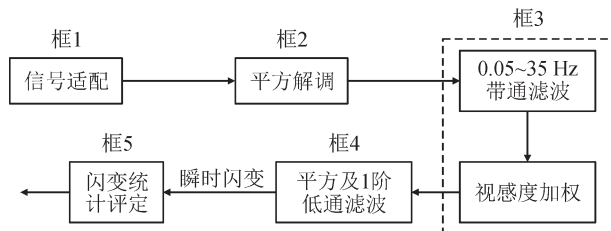


图1 闪变测量功能框图(交流系统)

Fig. 1 Functional diagram of IEC flicker meter (AC system)

2.2 直流配电系统闪变及其测量方法研究

2.2.1 交流闪变测量方法的适用性分析

闪变既然是主体人对灯光照度变化的视感,无论是交流系统还是直流系统,视感的主体——人是不变的,图1交流系统闪变测量方法所包含的框3、

表1 式(4)对应参数列表

Table 1	Indicative values for the parameters	
变量	230 V 灯	120 V 灯
k	1.748 02	1.635 700
λ	$2\pi \times 4.059\ 81$	$2\pi \times 4.167\ 375$
ω_1	$2\pi \times 9.154\ 94$	$2\pi \times 9.071\ 690$
ω_2	$2\pi \times 2.279\ 79$	$2\pi \times 2.939\ 902$
ω_3	$2\pi \times 1.225\ 35$	$2\pi \times 1.394\ 468$
ω_4	$2\pi \times 21.900\ 00$	$2\pi \times 17.315\ 120$

框4、框5三个环节均是定量描述人眼对灯光照度变化的感知过程,因此仍适用于直流系统闪变的测量。对于图1中框2所规定的平方解调,若视直流系统为交流系统的特例(额定频率为0)也是可行的(见下述分析)。也就是说,IEC 61000-4-15:2010所规定的交流系统的闪变测量方法是可以应用于直流配电系统的。

设交流电压信号为

$$u_i = A[1 + m \cos(\Omega \cdot t)] \cos(\omega t) \quad (5)$$

式(5)中: A 为工频载波电压的幅值; m 为调幅波电压占工频幅值的百分比; Ω 为调幅波频率; ω 为工频角频率。

对式(5)信号进行平方解调,则平方解调后所包含信号的幅值及其对应频率见表2第二列。若令式(5)中 $\omega=0$,即幅值为 A 的直流信号受到幅度为 m 、频率为 Ω 的调制波调制,则平方解调后所包含信号的幅值及其对应频率见表2第三列。分析表2可见:与交流信号一样,直流波动信号平方解调一样可以得到频率为 Ω 的调制波信号,其区别仅在于调制波 Ω 的幅值增加了一倍,因此仍可采用图1方法进行对应闪变测量。

表2 波动信号平方解调后包含的频谱分量

Table 2 Spectrum components after squaring voltage signal

角频率	交流载波幅值/ V^2	直流载波($\omega=0$)幅值/ V^2
直流	$(A^2/2)(1+m^2/2)$	$A^2(1+m^2/2)$
Ω	mA^2	$2mA^2$
2Ω	$m^2A^2/4$	$m^2A^2/2$
2ω	$A^2(1+m^2/2)/2$	
$2(\omega+\Omega)$	$m^2A^2/8$	
$2(\omega-\Omega)$	$m^2A^2/8$	
$2\omega+\Omega$	$m^2A^2/2$	
$2\omega-\Omega$	$m^2A^2/2$	

2.2.2 直流系统去平方解调闪变测量方法

尽管传统的交流系统闪变测量方法可适用于直流系统的闪变测量,但是这一方法存在其固有缺陷。

由表2可见,信号平方后频率为 Ω 的波动分量

变为 $2mA^2$,同时引入2倍频 Ω 分量,直流信号也变为 $A^2(1+m^2/2)$ 。下面分析这些变化所引入的误差。首先,新引入的2倍频 Ω 分量尽管可通过后续滤波环节消除其影响,但是在波动频度 Ω 较低的情况下其2倍频仍可能在0.05~35 Hz之间,效果仍然存在。其次,要抽取波动分量的波动幅度 $2m$ (电压波动),需要除以 A^2 ,工程实现时认为 A^2 近似等于平方解调后的直流分量,即 $A^2\approx A^2(1+m^2/2)$,这种假设在波动幅度 m 较小时成立,随着波动幅度的增大 $m^2/2$ 将不能忽略,否则本环节将会引起由此导致的误差为 $-m^2/(m^2+2)$,这也是平方解调方法的固有缺陷即仅适用于较小波动幅度解调。

实际上,分析式(5)可见:对于直流系统即在 $\omega=0$ 的情况下,不需要沿用平方解调的方法获取调制波信号,直流波动信号可直接施加于0.05~35 Hz的带通滤波从而得到其电压波动水平 $m\times\cos(\Omega\times t)$,见图2。即图1方法中去掉平方解调环节(图1中框2)后可直接用于进行直流配电系统闪变的测量,这样不仅简化了闪变的测量环节,同时避免了因平方解调引起的附加误差,大大提高闪变测量的准确度。

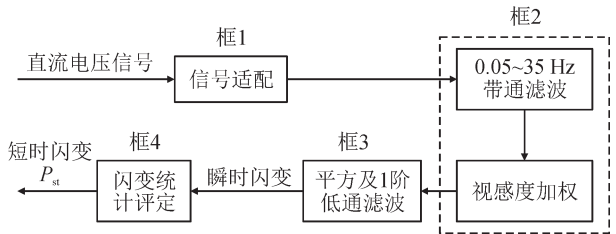


图2 闪变测量功能框图(直流系统)
Fig.2 Functional diagram of DC system flicker measurement

3 去平方解调闪变测量方法验证

3.1 验证方法

根据 IEC 61000-4-15:2010 要求,在表3方波信号的调制下,闪变测量结果应该满足 $P_{st}=1\pm5\%$ 。根据 GB/T 19862—2016 规定,闪变测量范围一般在0.2~10之间,其影响量范围在0~20之间。据此,文中采用表3方波对直流信号进行调制,分两种情况分析:①设定 P_{st} 在1~10范围内变化;②设定 P_{st} 在10~50之间变化。

表3 方波调制验证信号

Table 3 Square wave for modulation		
每分钟变化频度/次	对应频率/Hz	调制波幅度/%
1	0.008 333	2.715
2	0.016 667	2.191
7	0.058 333	1.450
39	0.325 000	0.894
110	0.916 667	0.722
1 260	10.500 000	0.407
4 000	33.333 330	2.343

3.2 验证结果

在表3方波信号的调制下,针对3.1节所述两种情况分别应用传统平方解调方法(图1)及文中提出的去平方解调方法(图2)分析计算,结果见表4~7、图3(图中仅显示 $P_{st}=1$ 和 $P_{st}=10$ 时的两条误差曲线,其余误差曲线在这两条曲线之间)、图4(图中仅显示 $P_{st}=10$ 和 $P_{st}=50$ 时的两条误差曲线,其余误差曲线在这两条曲线之间)。

表4 P_{st} 在1~10范围内变化时两种方法闪变计算结果比较

Table 4 Comparison of flicker measurement result using two different methods($1\leq P_{st}\leq 10$)										
频度/(次·min ⁻¹)	$P_{st}=1$	$P_{st}=2$	$P_{st}=3$	$P_{st}=4$	$P_{st}=5$	$P_{st}=6$	$P_{st}=7$	$P_{st}=8$	$P_{st}=9$	$P_{st}=10$
传统平方解调算法	1	1.000 4	1.997 9	2.991 4	3.980 0	4.962 5	5.937 9	6.905 2	7.863 5	8.811 8
	2	1.005 8	2.009 5	3.010 3	4.007 6	5.000 6	5.988 7	6.971 1	7.947 3	8.916 5
	7	0.996 5	1.992 5	2.987 8	3.982 1	4.974 9	5.966 0	6.955 2	7.942 0	8.926 2
	39	1.020 1	2.040 1	3.059 8	4.079 1	5.097 9	6.115 9	7.133 3	8.149 7	9.165 1
	110	1.018 8	2.037 6	3.056 1	4.074 4	5.092 4	6.110 0	7.127 1	8.143 6	9.159 5
	1 260	1.010 4	2.020 7	3.031 0	4.041 2	5.051 3	6.061 3	7.071 1	8.080 8	9.090 2
	4 000	1.013 0	2.025 1	3.035 6	4.043 5	5.048 2	6.048 7	7.044 2	8.034 1	9.017 4
文中提出的改进算法	1	1.001 0	2.001 1	3.000 3	3.998 7	4.996 1	5.992 8	6.988 5	7.983 4	8.977 4
	2	1.006 3	2.011 9	3.016 8	4.020 9	5.024 4	6.027 2	7.029 2	8.030 6	9.031 2
	7	0.996 6	1.993 1	2.989 6	3.985 9	4.982 3	5.978 5	6.974 7	7.970 8	8.966 9
	39	1.020 2	2.040 3	3.060 5	4.080 6	5.100 7	6.120 8	7.140 8	8.160 8	9.180 8
	110	1.018 8	2.037 7	3.056 5	4.075 3	5.094 1	6.113 0	7.131 8	8.150 6	9.169 4
	1 260	1.010 4	2.020 7	3.031 1	4.041 5	5.051 8	6.062 2	7.072 6	8.082 9	9.093 3
	4 000	1.013 1	2.026 2	3.039 3	4.052 5	5.065 6	6.078 6	7.091 7	8.104 8	9.117 9

表5 P_{st} 在1~10范围内变化时两种方法闪变计算误差比较Table 5 Comparison of uncertainty of two different methods($1 \leq P_{st} \leq 10$)

频度/(次·min ⁻¹)	$P_{st}=1$	$P_{st}=2$	$P_{st}=3$	$P_{st}=4$	$P_{st}=5$	$P_{st}=6$	$P_{st}=7$	$P_{st}=8$	$P_{st}=9$	$P_{st}=10$	
传统平方解调算法	1	0.04	-0.105	-0.286 670	-0.500 0	-0.750	-1.035 000	-1.354 290	-1.706 25	-2.091 110	-2.509
	2	0.58	0.475	0.343 333	0.190 0	0.012	-0.188 330	-0.412 860	-0.658 75	-0.927 780	-1.218
	7	-0.35	-0.375	-0.406 670	-0.447 5	-0.502	-0.566 670	-0.640 000	-0.725 00	-0.820 000	-0.925
	39	2.01	2.005	1.993 333	1.977 5	1.958	1.931 667	1.904 286	1.871 25	1.834 444	1.793
	110	1.88	1.880	1.870 000	1.860 0	1.848	1.833 333	1.815 714	1.795 00	1.772 222	1.747
	1 260	1.04	1.035	1.033 333	1.030 0	1.026	1.021 667	1.015 714	1.010 00	1.002 222	0.994
	4 000	1.30	1.255	1.186 667	1.087 5	0.964	0.811 667	0.631 429	0.426 25	0.193 333	-0.065
文中提出的改进算法	1	0.10	0.055	0.010 000	-0.032 5	-0.078	-0.120 000	-0.164 290	-0.207 50	-0.251 110	-0.295
	2	0.63	0.595	0.560 000	0.522 5	0.488	0.453 333	0.417 143	0.382 50	0.346 667	0.311
	7	-0.34	-0.345	-0.346 67	-0.352 5	-0.354	-0.358 330	-0.361 430	-0.365 00	-0.367 780	-0.372
	39	2.02	2.015	2.016 667	2.015 0	2.014	2.013 333	2.011 429	2.010 00	2.008 889	2.008
	110	1.88	1.885	1.883 333	1.882 5	1.882	1.883 333	1.882 857	1.882 50	1.882 222	1.882
	1 260	1.04	1.035	1.036 667	1.037 5	1.036	1.036 667	1.037 143	1.036 25	1.036 667	1.036
	4 000	1.31	1.310	1.310 000	1.312 5	1.312	1.310 000	1.310 000	1.310 00	1.310 000	1.310

表6 P_{st} 在10~50范围内变化时两种方法闪变计算结果比较Table 6 Comparison of flicker measurement result using two different methods($10 \leq P_{st} \leq 50$)

频度/(次·min ⁻¹)	$P_{st}=10$	$P_{st}=15$	$P_{st}=20$	$P_{st}=25$	$P_{st}=30$	$P_{st}=35$	$P_{st}=40$	$P_{st}=45$	$P_{st}=50$	
传统平方解调算法	1	9.749 1	14.243 5	18.353 9	22.017 5	25.200 7	27.896 9	30.120 5	31.901 7	33.280 9
	2	9.878 2	14.552 6	18.955 2	23.031 8	26.743 9	30.068 5	32.997 2	35.533 7	37.691 9
	7	9.907 5	14.759 9	19.496 4	24.084 0	28.493 5	32.699 6	36.681 7	40.423 5	43.913 6
	39	10.179 3	15.229 4	20.233 2	25.176 5	30.045 5	34.827 3	39.509 7	44.081 2	48.531 7
	110	10.174 7	15.236 8	20.269 2	25.262 2	30.206 5	35.093 2	39.913 6	44.659 5	49.323 0
	1 260	10.099 4	15.141 3	20.173 7	25.193 6	30.197 9	35.183 6	40.147 6	45.087 1	49.999 0
	4 000	9.993 5	14.740 5	19.206 0	23.324 3	27.048 4	30.350 9	33.222 5	35.668 9	37.708 1
文中提出的改进算法	1	9.970 5	14.923 2	19.854 4	24.764 3	29.652 9	34.520 5	39.367 1	44.192 9	48.998 0
	2	10.031 1	15.020 2	19.991 8	24.946 0	29.882 9	34.802 5	39.705 0	44.590 4	49.458 8
	7	9.962 8	14.941 8	19.919 0	24.894 6	29.868 6	34.840 9	39.811 5	44.780 4	49.747 7
	39	10.200 8	15.300 4	20.399 3	25.497 8	30.595 6	35.692 9	40.789 7	45.885 8	50.981 4
	110	10.188 2	15.282 1	20.375 8	25.469 5	30.563 0	35.656 4	40.749 7	45.842 8	50.935 8
	1 260	10.103 6	15.155 4	20.207 2	25.259 0	30.310 7	35.362 5	40.414 2	45.465 9	50.517 5
	4 000	10.131 0	15.196 2	20.261 4	25.326 4	30.391 2	35.456 0	40.520 5	45.585 0	50.649 3

3.3 结果分析及结论

分析表4~7、图3、4可见下述现象:随着波动幅度的增大,传统的平方解调方法表现出了明显的误差增大的固有特性,已不再适用闪变的测量;文中提出的去平方解调闪变测量方法在较宽的闪变变化范围内其误差维持恒定,满足 $\pm 5\%$ 的精度要求。

1) P_{st} 在1~10范围内变化时,平方解调和去平方解调两种测量方法得到的误差变化特征基本相同,且均可保证 $\pm 5\%$ 的误差要求,但文中提出的去平方解调测量方法误差更集中、更稳定,特别是在频度小

于7次/min或大于1 260次/min情况下更加明显;

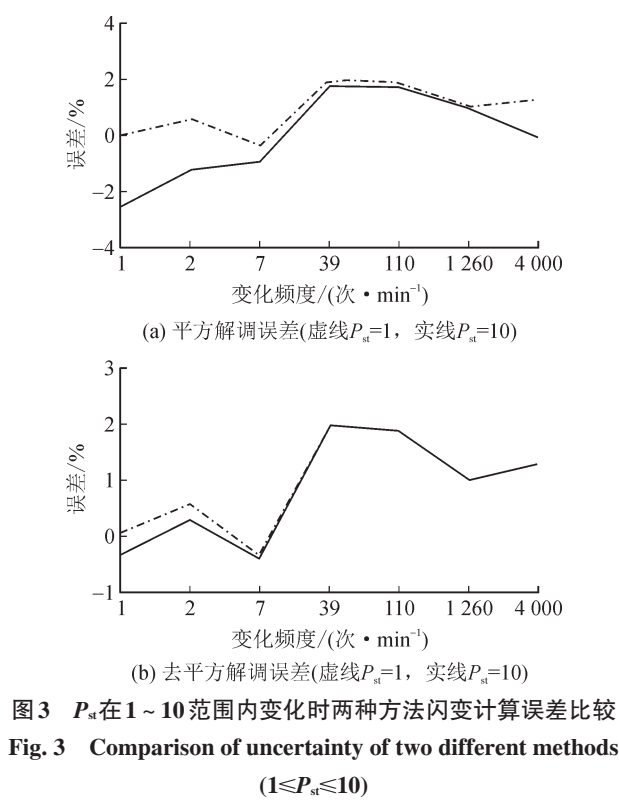
2) P_{st} 在10~50范围内变化时,平方解调算法表现出很大的误差。特别的,当 $P_{st} > 15$ 时平方解调算法已经无法保证 $\pm 5\%$ 的误差要求;但是本文提出的去平方解调测量方法在 P_{st} 处于1~50变化范围内仍呈现几乎相同的误差特性,在 $\pm 2\%$ 范围内;

3) $P_{st}=50$ 情况下采取两种方法针对不同频度的波动信号抽取的波动幅度见表8,从表8可见此时平方解调测量方法的误差已经很大,但文中提出的去

表 7 P_{st} 在 10~50 范围内变化时两种方法闪变计算误差比较

Table 7 Comparison of uncertainty of two different methods($10\leq P_{st}\leq 50$)

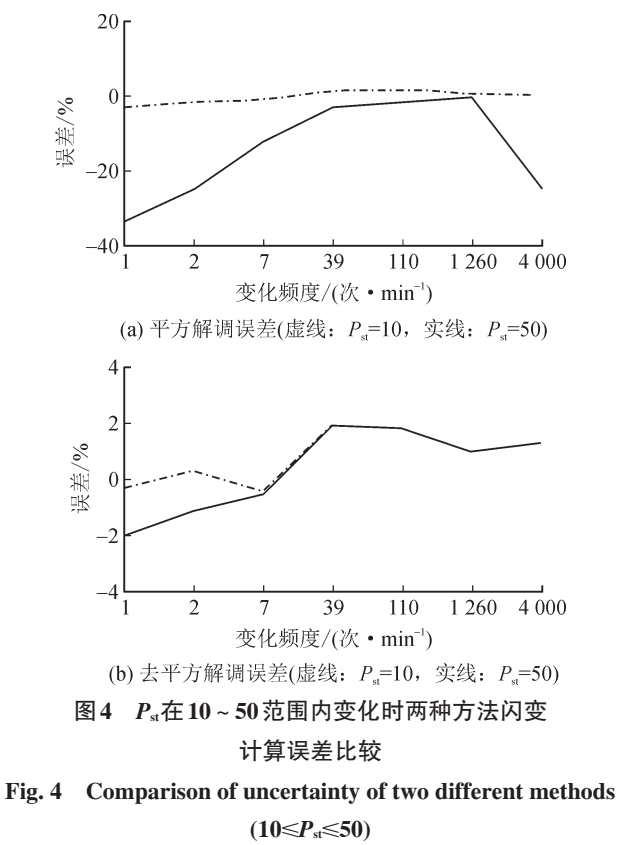
频度/(次·min ⁻¹)	$P_{st}=10$	$P_{st}=15$	$P_{st}=20$	$P_{st}=25$	$P_{st}=30$	$P_{st}=35$	$P_{st}=40$	$P_{st}=45$	$P_{st}=50$
传统平方解调算法	1	-2.509	-5.043 330	-8.230 5	-11.930 0	-15.997 700	-20.294 600	-24.698 80	-29.107 300
	2	-1.218	-2.982 670	-5.224 0	-7.872 8	-10.853 700	-14.090 000	-17.507 00	-21.036 200
	7	-0.925	-1.600 670	-2.518 0	-3.664 0	-5.021 670	-6.572 570	-8.295 75	-10.170 000
	39	1.793	1.529 333	1.166 0	0.706 0	0.1516 670	-0.493 430	-1.225 75	-2.041 780
	110	1.747	1.578 667	1.346 0	1.048 8	0.688 333	0.266 286	-0.216 00	-0.756 670
	1 260	0.994	0.942 000	0.868 5	0.774 4	0.659 667	0.524 571	0.369 00	0.193 556
文中提出的改进算法	4 000	-0.065	-1.730 000	-3.970 0	-6.702 8	-9.838 670	-13.283 100	-16.943 80	-20.735 800
	1	-0.295	-0.512 000	-0.728 0	-0.942 8	-1.157 000	-1.370 000	-1.582 25	-1.793 560
	2	0.311	0.134 667	-0.041 0	-0.216 0	-0.390 330	-0.564 290	-0.737 50	-0.910 220
	7	-0.372	-0.388 000	-0.405 0	-0.421 6	-0.438 000	-0.454 570	-0.471 25	-0.488 000
	39	2.008	2.002 667	1.996 5	1.991 2	1.985 333	1.979 714	1.974 25	1.968 444
	110	1.882	1.880 667	1.879 0	1.878 0	1.876 667	1.875 429	1.874 25	1.872 889
	1 260	1.036	1.036 000	1.036 0	1.036 0	1.035 667	1.035 714	1.035 50	1.035 333
	4 000	1.310	1.308 000	1.307 0	1.305 6	1.304 000	1.302 857	1.301 25	1.300 000



平方解调测量方法不存在这种影响,始终能够正确抽取调制波信号。

4 结语

文中从灯光照度变化入手,分析了直流配电系统电压波动的原因及其与灯光照度变化的相互关系,提出了适用于直流配电系统的基于纹波系数的灯光照度量化指标;文章结合直流配电系统的特



点,提出了区别于传统闪变测量的改进测量方法,即去除传统算法的平方解调环节,对直流电压信号直接进行 0.05~35 Hz 的带通滤波并进行视感度加权及后续处理。采用 IEC 61000-4-15:2010 要求的 7 种调制波验证分析表明:本文提出的针对直流配电系统的去平方解调闪变测量方法准确度高,在较宽的闪变变化范围内其误差基本维持恒定,大大优于传统的基于平方解调的闪变测量方法。

表8 两种方法得到的电压波动比较

Table 8 Comparison of voltage fluctuation extracted by two methods

每分钟变化 频度/次	理论调制 波幅度/%	平方解调得 到的调制波 幅度/%	去平方解调得到 的调制波幅度/%
1	135.75	87.319 0	128.556 0
2	109.55	79.389 9	104.174 3
7	72.50	63.596 3	72.045 4
39	44.70	42.423 3	44.564 7
110	36.10	34.929 0	36.071 1
1 260	20.35	20.137 4	20.346 2
4 000	117.15	87.185 4	117.106 7

参考文献:

- [1] Anon.LVDC: Electricity for the 21 century[R]. USA: IEC, 2017.
- [2] 陈红坤,何桂雄,石晶,等. 楼宇交直流混合供电模式下直流电压等级的研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20):5840-5851.
CHEN Hongkun, HE Guixiong, SHI Jing, et al. Research on DC voltage level of hybrid AC/DC building power supply system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5840-5851.
- [3] WANG Dong, EMHEMED A, BURT G, et al. Fault analysis of an active LVDC distribution network for utility applications[C]//2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Coimbra, Portugal: IEEE, 2016: 1-6.
- [4] 张旭乐,杨向阳,张浩哲,等.基于站用电供电的直流电压互感器冗余供电及抗干扰技术研究[J]. 变压器, 2023, 60(6):29-34.
ZHANG Xule, YANG Xiangyang, ZHANG Haozhe, et al. Research on edundant power supply and anti-interference technology of DC voltage transformer based on station power supply[J]. Transformer, 2023, 60(6):29-34.
- [5] 宋强,赵彪,刘文华,等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25):9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25):9-19.
- [6] 江道灼,郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8):98-104.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8):98-104.
- [7] SALONEN P, KAIPIA T, NUUTINEN P, et al. An LVDC distribution system concept[C]//Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE). Espoo, Finland:[s.n.], 2008: 1-7.
- [8] 汪倩,陈思磊,孟羽,等. 低压直流系统故障电弧检测技术研究综述[J]. 高压电器, 2023, 59(5):93-103.
WANG Qian, CHEN Silei, MENG Yu, et al. Review of research on DC arc fault detection technology in low voltage DC system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5):93-103.
- [9] 张华,周波,江珂滕,等. 光储充电站交直流配电方式能效对比[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(1): 84-92.
ZHANG Hua, ZHOU Bo, JIANG Keteng, et al. Comparison of energy efficiency of photovoltaic storage charging station between AC and DC power distribution modes[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(1): 84-92.
- [10] 熊雄,季宇,李蕊,等. 直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6802-6813.
XIONG Xiong, JI Yu, LI Rui, et al. An overview of key technology and demonstration application of DC distribution and consumption system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23):6802-6813.
- [11] 郑宇丁,田桂珍. 直流微电网基于自适应下垂系数算法的多储能SOC均衡控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(2): 131-138.
ZHENG Yuding, TIAN Guizhen. SOC balancing control strategy based on adaptive droop coefficient algorithm for multi-energy storage units in DC microgrid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(2): 131-138.
- [12] 马永翔,钱锴,闫群民,等. 孤岛直流微电网光储荷协调分层控制研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(1):129-135.
MA Yongxiang, QIAN Kai, YAN Qunmin, et al. Research on coordination and hierarchical control of photovoltaic, storage and load in island DC microgrid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(1): 129-135.
- [13] 于立杰,董沛毅. 多端柔性直流配电网运行策略优化研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(9):72-78.
YU Lijie, DONG Peiyi. Operation strategy optimization of multi-terminal flexible DC distribution network[J]. Smart Power, 2018, 46(9):72-78.
- [14] LVDC systems-assessment of standard voltages and power quality requirements: IEC/TR 63282:2020[S].2020.
- [15] 付光杰,周禹彤,褚思琦,等. 直流配电网电能质量综合评估[J]. 电工技术, 2022(7):69-73.
FU Guangjie, ZHOU Yutong, CHU Siqi, et al. Comprehensive evaluation of power quality of DC distribution network[J]. Electric Engineering, 2022(7):69-73.
- [16] BOLLEN M, RÖNNBERG S, ZAVODA F, et al. CIGRE/CI-

- RED working group C4. 24-power quality and EMC issues associated with future electricity networks[C]//23rd International Conference on Electricity Distribution. Lyon: CIGRE, 2016: 0181-1-0181-5.
- [17] 廖建权, 周念成, 王强钢, 等. 直流配电网电能质量指标定义及关联性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6847-6860.
- LIAO Jianquan, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Definition and correlation analysis of power quality index of DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6847-6860.
- [18] IEEE recommended practices for modulating current in high - brightness LEDs for mitigating health risks to viewers: IEEE Std 1789(TM): 2015[S]. 2015.
- [19] 吴建章, 沙浩源, 张宸宇, 等. 基于 PSO-SVM 的直流配电网电能质量扰动辨识[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 18-25.
- WU Jianzhang, SHA Haoyuan, ZHANG Chenyu, et al. Identification of power quality disturbance in DC distribution network based on PSO - SVM[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2019, 38(4): 18-25.
- [20] Electromagnetic compatibility(EMC)-Part 4-15: Testing and measurement techniques - flickermeter - functional and design specification; IEC 61000-4-15: 2010[S]. 2010.
- [21] BOLLEN M, BAHRAMIRAD S, KHODAEI A, et al. Volt-var control and power quality(CIGRE/CIGRE C4. 24)[C]//23rd International Conference on Electricity Distribution. Lyon: CIGRE, 2016: 0183-1-0183-5.
- [22] WANG H, TIAN J, WANG Y, et al. A DC fluctuation suppression control strategy for isolated DC microgrids based on linear active disturbance rejection control(LADRC)[C]//2021 IEEE/IAS industrial and commercial power system Asia(I&CPS Asia). Chengdu, China: IEEE, 2021: 1-5.
- [23] 电能质量 电压波动和闪变: GB/T 12326—2000[S]. 2000. Power quality-voltage fluctuation and flicker: GB/T 12326—2000[S]. 2000.
- [24] 李世林, 刘军成. 电能质量国家标准应用手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- LI Shilin, LIU Juncheng. Application manual of National standards for power quality[M]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [25] LIU Fengyi. Control strategy of DC/DC converter for photovoltaic-storage-DC microgrid based on improved LADRC[J]. Journal of Physics Conference Series, 2022, 2290(1): 012065.
- [26] MA K, LI E, HE B, et al. Mechanism and cancellation of DC current fluctuation in MMC excited by circulating current mitigation under nearest level control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(6): 6822-6831.
- [27] HE Bin, MA Ke, XIN Xikai, et al. Hybrid modulation method for nearest-level-control-based MMC to suppress DC power fluctuation when enabling circulating current suppression[C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). [S.l.]: IEEE, 2020: 6232-6237.
- [28] JIAO J, JIA Q. Ripple formation mechanism and superimposition characteristics for flexible DC distribution network[J]. Power Syst Technol, 2017, 41(6): 1726-1733.
- [29] Electromagnetic compatibility (EMC) - part 4 - 17: Testing and measurement techniques - ripple on DC input power port immunity test; IEC 61000-4-17: 2009[S]. 2009.
- [30] Anon. Ripple, noise, flicker and dimming depth with LED drivers[EB/OL]. [2024 - 05 - 06]. <https://www.moonsindustries.com/article/article-en-led-driverr-00010>.
- [31] LIU Juncheng. A study of SVC in mitigating flickers produced by industry consumers[C]//2006 China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2006). [S.l.]: [s.n.], 2006: 1-4.

苏 灿(1994—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电能质量分析与治理、新能源技术相关研究(E-mail: sucn51372@163.com)。

周 文(1978—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电能质量分析与治理相关研究(E-mail: hbdyyzhw@163.com)。

胡雪凯(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源并网控制技术(E-mail: 719872361@qq.com)。

闫 鹏(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源并网控制技术及电能质量技术(E-mail: dy_yanp@163.com)。

孟 良(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为分布式电源与储能运行控制(E-mail: 15133128069@139.com)。

刘军成(1966—), 男, 硕士, 教授级高工, 研究方向为电能质量检测控制(E-mail: junchengL@263.net)。