

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240464

直流配电网电能质量指标研究综述

张智¹, 徐永海¹, 张世聪¹, 费骏韬², 郑仙², 陶顺¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 随着新能源的接入以及直流负荷的可控性和灵活性不断提高, 直流配电网展现出广阔的发展前景。大量的分布式电源、敏感设备与电力电子设备的接入对直流配电网的电能质量提出了更严格的要求。介绍了直流配电网的典型接线结构、电压等级范围以及换流器的控制方式。依据已有的参考文献或标准, 分析了直流配电网中的电能质量现象扰动机理, 提出了更为规范化的直流电能质量指标体系, 并将其划分为变化型和事件型。其中变化型包括电压偏差、快速电压变动、电压闪变、电压不平衡和纹波, 事件型包括电压暂降、电压中断和过电压。对直流电能质量指标的测量方法和限值要求进行总结和分析。最后, 对直流电能质量的指标体系、测量方法和限值要求的未来研究方向进行了展望。

关键词: 直流配电网; 电能质量; 指标; 限值; 测量方法

Review of power quality indices of a DC distribution network

ZHANG Zhi¹, XU Yonghai¹, ZHANG Shicong¹, FEI Juntao², ZHENG Xian², TAO Shun¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: With the integration of new energy sources and the continuous improvement of the controllability and flexibility of DC loads, DC distribution networks show broad development prospects. The integration of a large number of distributed power sources, sensitive equipment, and power electronic devices imposes stricter requirements on the power quality of DC distribution networks. This paper introduces the typical wiring structure, voltage level range, and control methods of converters in DC distribution networks. Based on existing references and standards, it analyzes the disturbance mechanisms of power quality phenomena in DC distribution networks and proposes a more standardized DC power quality index system. This system is divided into two types: variation and event. The variation type includes voltage deviation, rapid voltage change, voltage flicker, voltage imbalance, and ripple; the event type includes voltage sag, voltage interruption, and overvoltage. The measurement methods and limit requirements for DC power quality indicators are summarized and analyzed. Finally, the future research directions for the index system, measurement methods, and limit requirements of DC power quality are discussed.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5400-202258419A-2-0-ZN).

Key words: DC distribution network; power quality; indices; limit; measuring method

0 引言

直流配电网作为新型电力系统的重要组成部分, 以直流供电形式通过换流设备与分布式电源、储能、交直流负荷以及交流电网或其他不同电压等级的直流配电网相连接^[1-5]。此外, 直流配电网具备

在并网模式(与交流电网有功率交换)与孤岛模式(与交流电网无功率交换)间灵活切换运行的能力^[6-7], 具有功率转换容量小、交互能量高、无需考虑频率同步和无功损耗等优势^[8-11], 其发展和推广有利于能源的高效利用与可再生能源的大规模消纳。近年来, 美国、德国、丹麦、日本、韩国等国家都逐渐开展直流配电网的相关研究, 我国在此方面也开展了大量的研究, 已建成苏州工业园示范工程、珠海唐家湾示范工程等直流配电网示范工程^[12]。未来我国

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助 (5400-202258419A-2-0-ZN)

直流配电工程的发展将更加智能化、节能环保、安全可靠。

随着越来越多分布式能源和储能的接入, LED、电动汽车、数据中心、智能楼宇和家用电器等直流负荷大量出现, 直流配电网呈现高度电力电子化的特征, 其电能质量扰动更加错综复杂^[5], 给直流配电系统带来了新的挑战。文献[13]主要介绍了低压直流领域标准化发展背景和需求, 以及国内外低压直流标准化工作动态。2014年11月, IEC SMB 东京会议成立了 IEC/SEG6 非传统配电网/微网系统评估组, 其与 IEC/SEG4 低压直流工作组紧密合作, 开展直流微网相关标准工作^[14]。2017年10月, IEC/TC8 在俄罗斯召开的年会上决议成立 IEC/TC8 WG9 工作组, 该工作组主要研究直流配电相关问题, 其内容涉及到直流配电的电能质量、兼容性以及测试方法等规范^[13]。2021年1月, 为解决直流配电网在电能质量指标描述、电能质量测量方法、EMC 兼容性、规划设计、电能质量危害分析以及电压电流测量溯源等方面存在的问题^[15], 欧洲启动了“直流电网测量标准化”项目。

然而, 目前尚无明确、具体的直流配电网电能质量评价体系和测量方法, 缺乏科学、完善的评估方法, 直流配电网电能质量指标限值的确定有待进一步探讨。文献[16]对低压直流配电系统的电压水平和相关方面(电能质量、电磁兼容、测量等)的标准化提出了建议, 但对其中的一些技术内容未详尽解释。文献[17]对交直流电能质量的差异进行分析, 依据交流电能质量体系, 对直流体系中的电压偏差、纹波、电压波动与闪变、电压不平衡、电压暂降等现象进行了定义。文献[18]阐述了国内外相关的直流配电电能质量标准和评估方法, 并归纳了直流配电网中电能质量问题的治理方案。对于直流电能质量的测量, 负责欧洲标准 EN 50160 和 IEC 61000-4-30 电能质量测量标准的国际委员会已经开始对这一问题进行一些初步研究, 以便于在未来的修订中将这两个标准的范围扩展到公共直流配电网中^[19]。文献[15]提到类比交流工频的概念, 将直流参数测量的“工频周期”定为 20 ms, 便于实现交直流电能质量监测方法的统一。文献[20]依据交流网络的电能质量测量方法, 对直流系统中的电压暂降、快速电压变动、纹波等扰动现象的测量方法进行定义。对于中低压直流配电网电能质量的限值问题, 文献[21]对美国海军应用的直流电压接口标准提出了建议, 标准包括各电压等级的电压偏差、纹波、电压暂降等指标的限值, 为直流配电电压标准的制定提供了参考。直流电能质量扰动的复杂性^[5]将给直流

电能质量的评估工作提出更高的要求。

本文对直流配电网电能质量进行综述, 介绍了直流配电网的典型接线结构、电压等级范围以及换流器的控制方式, 对直流配电网中的电能质量现象进行分类, 主要针对电压偏差、电压不平衡、电压纹波、快速电压变动、电压闪变、过电压和电压暂降与短时中断等现象的产生机理进行分析与归纳, 提出了更为规范的直流配电网电能质量指标体系。通过调研相关参考文献或标准, 对直流配电网电能质量指标的时间组合计算方法、测量方法和限值要求进行归纳与完善, 并对现阶段直流配电网电能质量指标体系、测量方法和限值要求所面临的主要问题及未来研究方向进行展望。

1 直流配电网概述

1.1 接线结构

直流配电网换流器的接线形式可分为单极结构和双极结构, 单极结构又可分为非对称单极结构和对称单极(又称为“伪双极”结构), 具体的接线形式如图 1 所示。在双极结构中, 由于正负极电压不互相独立, 两极的电源功率波动、负荷不平衡变化等导致两极电压不相等, 使得中性线产生不平衡电流, 增加了馈线及接地导体的损耗。

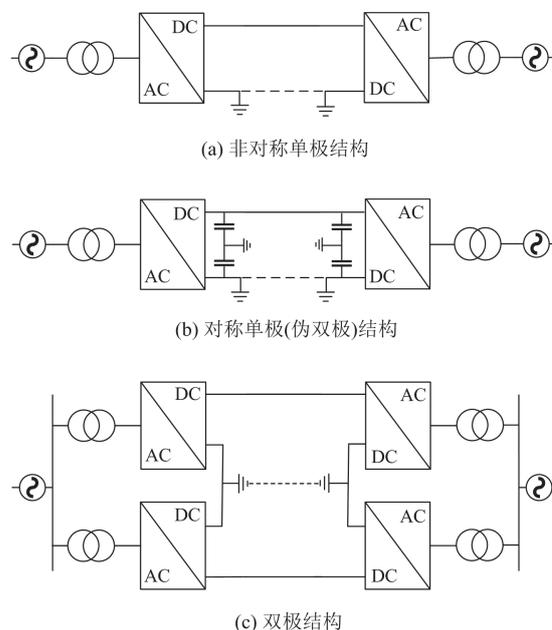


图 1 直流配电网接线结构

Fig. 1 Wiring structure of DC distribution network

双极结构在故障工况下正、负极换流器可单独运行, 可靠性较高, 但造价较高。对称单极(伪双极)结构类似于单极结构, 其换流器和设备绝缘投资较

少,但发生故障时无法保证单极运行,与双极结构相比可靠性较差。

1.2 电压等级范围

对于中低压直流配电电压等级的划分,文献[22]将 3000(±1500) V~±50 kV 划定为中压范围,将 110 V~1500(±750) V 划定为低压范围。低压直流配电通常用于家庭和商业建筑、小型充电设备、高效能源系统和电动工具及小型机械设备等负荷。中压直流配电则适用于较大规模的负荷,比如工业制造等,也可以用于连接并传输新能源发电站的直流电能。表 1 为国内外中低压直流供电系统电压等级^[23](以单极电压表示)。

表 1 国内外中低压直流供电系统电压等级

Table 1 Medium and low voltage DC power supply system voltage levels at home and abroad

应用	电压等级/V
IEC 标准	48/110/125/220/250/440/600/750/1500
电力行业	110/220
通信行业	48/240/270/300/320/336/350/380/400
城市轨道交通	600/750/1500/3000
船舰供电	750/1500/3000/6000/12 000/ 18 000/24 000/30 000
航空供电	270
楼宇供电	380

在通信行业中,直流供电电压等级较多,其中 48 V 和 400 V 是使用最多的直流电压等级。欧洲电信标准协会建议数据中心和电动汽车的直流电压等级为 400 V^[24]。在城市轨道交通系统中,直流供电电压等级为 600 V、750 V、1500 V 和 3000 V。大型船舰供电系统采用 750 V、1500 V 和 3000 V 等电压等级^[23]。对于低压直流配电电压优选值和备选值的选取,文献[25]给出的优选值为 1500 V、750 V 和 220 V,备选值为 1000 V、600 V、440 V、400 V、336 V、240 V 和 110 V。

1.3 控制方式

直流配电网控制策略主要有主从控制、裕度控制、下垂控制等方式^[26-28]。直流配电网的控制对网络运行特性起决定作用,有必要比较分析直流配电网在故障或扰动条件下不同控制策略对配电网电压的控制作用与效果。

1.3.1 主从控制

主从控制方式是一种集中控制方式,其中一个换流器扮演主控制角色,设置为恒压控制模式来平衡系统功率。其他换流器则作为从控制角色,设置为恒功率或恒电流模式。图 2 为直流电网的主从控制方案。主从控制方式可以实现对电压和电流等参

数的精确控制,但这种控制方式过度依赖各换流器之间的快速通信,其电压动态调节性能差,可能会引起过电压或欠电压^[26]。

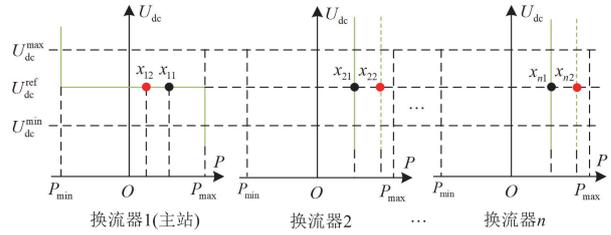


图 2 主从控制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of master-slave control

1.3.2 裕度控制

裕度控制方式是主从控制的拓展策略。在保证只有一个换流站工作在恒压控制模式的情况下,当恒功率换流站的电压达到电压裕度值时,则切换到恒压控制模式,并以新的直流电压参考值运行。图 3 为直流电网的裕度控制方案。虽然裕度控制无需站间通信,但电压裕度的选取较为复杂^[27],控制模式的频繁切换可能会引起系统振荡^[26]。

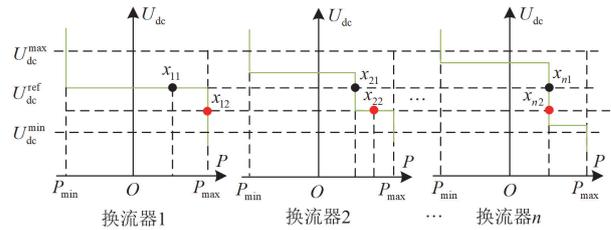


图 3 裕度控制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of margin control

1.3.3 下垂控制

下垂控制方式是一种分散控制方式,每个换流器根据自身输出电压来调节其输出电流,下垂特性如式(1)所示。

$$I_{dc}^{ref} = k_c (U_{dc} - U_{dc}^{ref}) \quad (1)$$

式中: I_{dc}^{ref} 为直流电流参考值; k_c 为下垂系数; U_{dc} 为直流母线电压值; U_{dc}^{ref} 为直流电压参考值。

图 4 为直流电网的下垂控制方案示意图。在下垂控制方式下,换流器的输出电压会根据负荷情况发生变化,可能导致一定的电压波动,甚至稳定运行时电压偏差超出额定范围^[27]。

下垂控制无需上层控制器和通信,具有较好的模块性和扩展性。然而,传统下垂控制未计及源荷变化的动态裕量,可能导致电压越限、换流站过载等问题,对敏感负荷和系统稳定造成不利影响^[28]。因此,学者们对传统下垂控制进行了不同程度的优化,其

中文献[28]提出一种将自适应控制、预测控制与下垂控制相结合的控制策略,以解决其电能质量较低、功率分配不合理和电压动态调节不理想等问题。

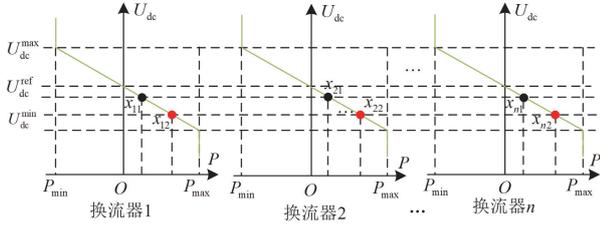


图4 下垂控制示意图

Fig. 4 Schematic diagram of droop control

2 直流电能质量事件

2.1 直流电能质量事件分类

以电能质量扰动现象变化的连续性和事件的突发性为分类准则^[29],并结合文献[5, 15-20, 30-31]对直流配电网电能质量的描述,根据直流电压的幅值、波形、持续时间和双极系统的对称性等参数衡量电压质量特征,将直流配电网电能质量现象划分为变化型和事件型,其中变化型有电压偏差、快速电压变动、电压闪变、电压不平衡和纹波,事件型有电压暂降、电压中断和过电压。本文提出了如图5所示的直流配电网电能质量分类。直流过电压分为持续过电压^[31]和短时过电压,短时过电压进一步分为暂时过电压(与电压暂升表述相同)和瞬态过电压^[32],瞬态过电压包括瞬变冲击和瞬变振荡两种电压瞬变现象。

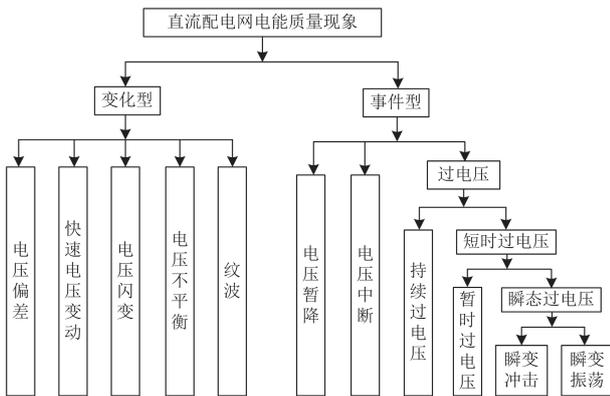


图5 直流配电网电能质量分类

Fig. 5 Power quality classification of DC distribution network

2.2 时间组合计算方法

对连续型直流电能质量进行评估时,文献[16]建议选用200 ms和10 min为直流量的测量时间窗宽进行时间组合计算,其中200 ms与文献[33]推荐的200 ms基本测量时间窗宽一致。本文选用200 ms为基本测量时间窗,选取基本量的方均根值或平均

值对3 s和10 min时间窗的基本量进行时间组合计算。方均根值时间组合计算方法如式(2)所示,平均值时间组合计算方法如式(3)所示。

$$\begin{cases} C_{\text{rms},200\text{ms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C^2(i)} \\ C_{\text{rms},3\text{s}} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} C_{\text{rms},200\text{ms}}^2(i)} \\ C_{\text{rms},10\text{min}} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} C_{\text{rms},3\text{s}}^2(i)} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} C_{\text{av},200\text{ms}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i(i) \\ C_{\text{av},3\text{s}} = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} C_{\text{av},200\text{ms}}(i) \\ C_{\text{av},10\text{min}} = \frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} C_{\text{av},3\text{s}}(i) \end{cases} \quad (3)$$

式中: C 为200 ms内电压或电流的采样值; n 为采样点数; i 为时间窗的个数; $C_{\text{rms},200\text{ms}}$ 和 $C_{\text{av},200\text{ms}}$ 分别为200 ms的方均根值和平均值; $C_{\text{rms},3\text{s}}$ 和 $C_{\text{av},3\text{s}}$ 分别为3 s的方均根值和平均值; $C_{\text{rms},10\text{min}}$ 和 $C_{\text{av},10\text{min}}$ 分别为10 min的方均根值和平均值。

3 变化型直流电能质量

3.1 电压偏差

在直流配电网中,负荷及分布式电源出力、运行方式及网络结构等发生变化都会引起直流配电网供需功率的变化,导致电压偏差的产生^[30]。直流电压偏差过大可能导致设备损坏、性能下降、能耗增加和系统不兼容等问题。直流配电网中的电压可分为端口电压(单极对零线或正负极间)和节点电压(线路对地),有相关研究选择不同类型电压作为优化问题的约束条件,文献[34-36]以端口电压作为约束进行优化,而文献[37-38]以节点电压作为约束进行优化。因此,电压偏差主要针对直流配电网的端口电压和节点电压进行计算和分析,电压偏差一般用电压偏差值与系统标称电压的百分比表示。

在双极结构中,电压偏差分为正极电压偏差、负极电压偏差和双极电压偏差^[39],如式(4)所示。

$$\begin{cases} \Delta U_p \% = \frac{U_{\text{pD}} - U_{\text{pN}}}{U_{\text{pN}}} \\ \Delta U_n \% = \frac{U_{\text{nD}} - U_{\text{nN}}}{U_{\text{nN}}} \\ \Delta U_{\text{pn}} \% = \frac{U_{\text{pnD}} - U_{\text{pnN}}}{U_{\text{pnN}}} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\Delta U_p\%$ 、 $\Delta U_n\%$ 、 $\Delta U_{pn}\%$ 分别为正极、负极、双极电压偏差百分数； U_{pD} 、 U_{nD} 、 U_{pnD} 分别为正极、负极、双极的实际运行直流电压； U_{pN} 、 U_{nN} 、 U_{pnN} 分别为正极、负极、双极直流标称电压。

直流配电网的节点电压偏差百分数如式(5)所示。

$$\Delta U_i\% = \frac{U_{iD} - U_{iN}}{U_{iN}} \quad (5)$$

式中： $\Delta U_i\%$ 为某节点的电压偏差百分数； U_{iD} 为某节点的实际运行直流电压； U_{iN} 为某节点所在网络的直流标称电压。

对于直流电压偏差的测量，根据文献[16]推荐的时间组合计算方法，本文选用 200 ms 内的实际运行直流电压计算一个方均根值，从而计算得到 200 ms 间隔的电压偏差。借鉴文献[33]将交流电压偏差分为负偏离和正偏离进行时间组合的计算方法，本文提出直流电压的负偏离和正偏离的时间组合计算方法，如式(6)和式(7)所示。

对于负偏离有：

若 $U_{\text{rms-200ms},i} > U_{\text{DN}}$ ，则 $U_{\text{rms-under},i} = U_{\text{DN}}$ ；

若 $U_{\text{rms-200ms},i} \leq U_{\text{DN}}$ ，则 $U_{\text{rms-under},i} = U_{\text{rms-200ms},i}$ ；

$$U_{\text{under}} = \frac{U_{\text{DN}} - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l U_{\text{rms-under},i}^2}{l}}}{U_{\text{DN}}} \times 100\% \quad (6)$$

对于正偏离有：

若 $U_{\text{rms-200ms},i} < U_{\text{DN}}$ ，则 $U_{\text{rms-over},i} = U_{\text{DN}}$ ；

若 $U_{\text{rms-200ms},i} \geq U_{\text{DN}}$ ，则 $U_{\text{rms-over},i} = U_{\text{rms-200ms},i}$ ；

$$U_{\text{over}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l U_{\text{rms-over},i}^2}{l}} - U_{\text{DN}}}{U_{\text{DN}}} \times 100\% \quad (7)$$

式中： $U_{\text{rms-200ms},i}$ 为聚合时间段内第 i 个 200 ms 的电压方均根值； $U_{\text{rms-under},i}$ 和 $U_{\text{rms-over},i}$ 分别为聚合时间段内第 i 个 200 ms 负偏离和正偏离的电压方均根值； U_{under} 和 U_{over} 分别为电压负偏离和正偏离百分数； U_{DN} 为直流电压标称值； l 为聚合时间段内负偏离和正偏离的 200 ms 方均根值的个数。

与交流系统电压偏差限值类似，直流配电网电压偏差的限值与电压等级相关。通常来讲，电压等级越高，允许的偏差幅度越小。对于直流配电网的电压偏差限值，文献[40]建议 30 kV 及以上电压偏差不得超过标称电压的 10%，10 kV 及以下供电电压允许偏差为标称电压的 $\pm 7\%$ 。中低压直流配电系统

电压偏差限值如表 2 所示^[22]。

表 2 中低压直流配电系统电压偏差限值

Table 2 Voltage deviation limited values of medium and low voltage DC distribution system

电压等级	限值
$\pm 10 \sim \pm 50$ kV	-10% ~ +5%
1500(± 750) V ~ ± 6 kV	-15% ~ +5%
1500(± 750) V 以下	-20% ~ +5%

注：未标正负号的电压对应单极结构，标有正负号的电压对应双极结构。

文献[41]根据维持系统正常运行的电磁兼容特性、维持电力负荷正常工作特性、维持与交流电网并网能力和保证直流系统较高供电能力 4 方面要求给出了直流电压偏差建议值，如表 3 所示。

表 3 文献[41]给出的直流配电系统电压偏差建议限值

Table 3 Suggested limited values of voltage deviation of DC distribution system in reference [41]

电压等级	限值
± 15 kV ~ ± 50 kV	-15% ~ +5%
1500(± 750) V ~ ± 15 kV	-17% ~ +7%
1500(± 750) V 以下	-20% ~ +10%

注：未标正负号的电压对应单极结构，标有正负号的电压对应双极结构。

文献[40]参照国标对交流电压偏差的限值，提出直流配电网的电压偏差限值建议，但推荐限值的电压等级划分较为粗略。文献[22]综合考虑了交直流系统互联的兼容性、安全性和经济性等因素，对不同电压等级的电压偏差限值进行规范化修订。文献[41]提出的建议值相对文献[22]将直流电压偏差限值区间放宽，有利于提高供电半径和供电范围，使调度运行更加简单^[4]，降低了运维成本，提高了直流配电网的适应性和灵活性。但限值区间的放宽可能存在一些不利之处，如对换流器的设计与控制难度大、对设备的安全与绝缘要求更高、影响电网的稳定性等^[4]。

3.2 电压不平衡

在直流配电网双极结构中，正负极母线所接负载不平衡是导致正负极电压不平衡的根本原因。两换流器参考值、下垂系数、换流器出口侧电阻、正负极所接负荷都会影响到两极电压的不平衡^[42]，如图 6 所示。不平衡供电会使得正负极母线与接地中性点之间的电压出现电压偏差，属于双极性配电固有电能质量问题，其不平衡电流会增大接地导体馈线的损耗，增加换流器运行复杂程度及损耗等。

为评估正负母线电压偏差严重程度，需定义电压不平衡度的概念。目前多采用差模分量与共模分量的比值定义不平衡度^[17,42-46]，即正负极相对偏差

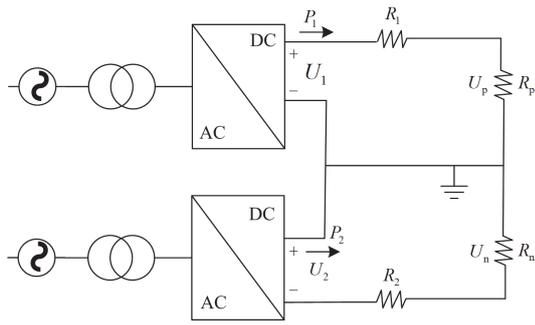


图6 直流配电网双极运行方式

Fig. 6 Bipolar operation mode of DC distribution network

与正负极电压平均值比值的百分数,如式(8)所示。

$$\varepsilon_1 = \frac{|U_p - U_n|}{\frac{1}{2}(U_p + U_n)} \times 100\% \quad (8)$$

式中: U_p 为直流正极电压; U_n 为直流负极电压。

为衡量不平衡电压与系统标称电压的关系,电压不平衡度可定义为正负极相对偏差与单极(正极或负极)电压标称值比值的百分数^[15,47],如式(9)所示。

$$\varepsilon_2 = \frac{|U_p - U_n|}{U_{(p,n)N}} \times 100\% \quad (9)$$

式中, $U_{(p,n)N}$ 为单极(正极或负极)电压标称值,通常正极和负极电压标称值相等。

式(8)的大小主要受正负极实际运行电压平均值的影响。式(9)主要衡量不平衡电压与系统额定水平的关系,由于分母恒定,其值受正负极实际运行电压影响较小。若正负极实际运行电压平均值近似单极的标称电压,则式(8)与式(9)的计算值更为接近。

对于三相交流系统,美国国家标准化组织制定的电力系统设备电压等级标准^[48]对电压不平衡度提出的限值为3%。目前尚无标准明确直流配电网的不平衡度限值,文献[42-45]对双极结构的不平衡电压进行研究,沿用交流电压不平衡度的思路将式(8)形式下的电压不平衡度限值也选为3%,实现了交直流系统电压不平衡度限值大小的统一。

对于电压不平衡度的测量,本文选取200ms作为测量时间窗^[16]对正极电压和负极电压的幅值计算方均根值,根据电压不平衡度定义计算得到200ms时间间隔的一个不平衡度记录。

3.3 纹波

纹波是指在恒定的直流电压或电流中叠加的交流成分,具有周期性。国内外的大多数学者采用纹波^[15-16,19-21,31,49]来描述直流电压或电流中的交流分

量,也有学者采用谐波^[5,17-18,30]术语,但诠释的内容相同。直流配电网中的分布式电源、交直流负荷以及交流电网等均通过电力电子装置接入,直流母线会产生一定含量的纹波。为了便于讨论与直流配电网相联的上级交流电网及经逆变器接入的交流负荷对直流侧纹波的影响,多数研究将直流侧纹波按交流工频及其倍数分为1次纹波、2次纹波、…、 k 次纹波^[5,17,30-31,49]。在未与上级交流电网和交流负荷相联的直流配电网的场景下,虽然该场景无交流电网或交流负荷注入交流因素,但直流换流器的接入也会导致直流侧产生交流分量即纹波,其主导频率尚无标准和文献给出,为了统一描述各直流配电网场景下的纹波,建议依然采用工频的倍数描述直流侧的纹波。纹波会影响设备性能、缩短使用设备寿命、引起电磁干扰等。纹波产生的部分原因如下^[49]。

(1) 换流器的类型:如6脉动换流器产生 $6k(k=1,2,3,\dots)$ 次特征纹波。

(2) 换流器的控制方式:以正弦脉宽调制SPWM为例,将相电压的开关函数进行二重傅里叶展开。展开式共包含3种频率类型,基波频率 f_0 ;载波谐波,频率为 $\lambda f_c(\lambda=1,2,3,\dots)$, f_c 为载波频率;边带谐波的频率为 $\lambda f_c + \mu f_0(\mu=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$,且不存在 $\lambda \pm \mu$ 为偶数的边带谐波,则开关函数的谐波分量在直流侧的表现是纹波。

(3) 交流三相电压不平衡:产生2次纹波。

(4) 交流侧谐波:交流侧电流包含 k 次谐波会使得直流侧电压出现 $k \pm 1$ 次纹波, $k=1,2,3,\dots$ 。

采用以下两种定义来描述直流纹波的大小,即纹波峰峰值系数^[15,19-20,50-51]和纹波有效值系数^[15,19-20,51]。纹波峰峰值系数 α 是指纹波电压的峰峰值(峰谷间差值)与直流电压中的直流分量之比,如式(10)所示。纹波有效值系数 β 是指纹波电压的方均根值与直流电压中的直流分量之比,如式(11)所示。直流电压纹波示意图如图7所示。

$$\alpha = \frac{U_{pp}}{U_0} \times 100\% = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_0} \times 100\% \quad (10)$$

$$\beta = \frac{U_{r,\text{rms}}}{U_0} \times 100\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m U_i^2 - U_0^2}}{U_0} \times 100\% \quad (11)$$

式中: U_{pp} 为纹波峰峰值; U_{\max} 和 U_{\min} 分别为测量时间窗内电压的最大值和最小值; $U_{r,\text{rms}}$ 为纹波电压方均根值; U_i 为第 i 点的直流电压瞬时值; m 为测量时间窗内的采样点数; U_0 为直流电压中的直流分量。

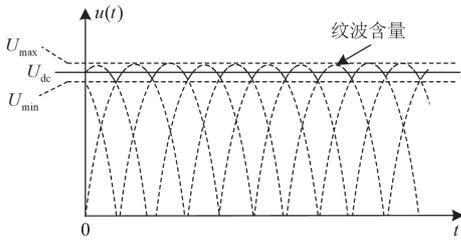


图 7 直流电压纹波示意图
Fig. 7 DC voltage ripple diagram

为了衡量直流电压中各次纹波的含量，以交流工频为基准频次，引入各次纹波电压含有率 H_{RU_k} 的概念^[17,30-31]，如式(12)所示。

$$H_{RU_k} = \frac{U_k}{U_0} \times 100\% \quad (12)$$

式中， U_k 为 k 次纹波电压方均根值。

对于纹波的测量，优先选择的适用于设备直流电源端口的试验等级^[52]如表 4 所示，试验等级对应的是以直流标称电压的百分数表示的峰峰电压值。对于纹波峰峰值计算，选取 200 ms 作为纹波测量时间窗^[16]，获取 200 ms 内瞬时值的最大值 $U_{\max}(200\text{ ms})$ 和最小值 $U_{\min}(200\text{ ms})$ ，并计算 $U_{pp}(200\text{ ms}) = U_{\max}(200\text{ ms}) - U_{\min}(200\text{ ms})$ 。直流电压的各次纹波电压方均根值 $U_k(200\text{ ms})$ 和直流纹波电压方均根值 $U_{r,rms}(200\text{ ms})$ 可通过对 200 ms 的直流电压进行频谱分析计算。对于纹波频次的测量，文献[51]提出低频纹波集群、高频纹波聚类的方法，最大程度解决了纹波测量中频谱泄漏的问题，提高了纹波测量的准确率。

表 4 试验等级
Table 4 Test grade

等级	相对直流标称电压的百分数/%
1	2
2	5
3	10
4	15
X	X

注：“X”是一个开放等级，可在产品要求中规定。

不控整流造成纹波电压和 PWM 调制造成开关频率的噪声，其电压的方均根值应控制在不超过 5% 的范围内^[53]。文献[54]对 48 V 直流微网供电电压质量的要求主要体现为纹波电压，即以频率为函数自变量，对纹波电压的峰峰值进行约束。48 V 直流纹波限值如表 5 所示。由表 5 可知，对于同电压等级的纹波，其限值随频率的增大而减小，充分限制了高频纹波的含量。

表 5 48 V 直流纹波限值

Table 5 48 V DC ripple limited values

频率/kHz	纹波电压(峰峰值)/V
$f < 1$	8
$1 \leq f < 30$	6
$30 \leq f < 200$	2

文献[21]给出了美国海军的直流电压接口标准的建议值。其中包括不同直流电压等级的纹波电压振幅限值，如表 6 所示。由表 6 可知，随着电压等级的增大，对纹波电压振幅的限值反而宽松，说明直流高电压等级对纹波电压质量要求较低，主要原因是直流高电压等级通常与其他配电系统互联^[25]，而直流低电压等级通常直接接入敏感负荷^[17]，对纹波电压质量要求较高，其限值更为严格。

表 6 文献[21]给出的不同直流电压等级纹波限值

Table 6 Ripple limited values of different DC voltage levels in reference [21]

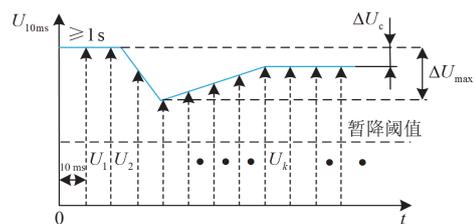
电压等级/V	纹波电压振幅
375/650	1.5% V_{rms}
1000	2.5% V_{rms}
6000/12 000/18 000	3.5% V_{rms}

注： V_{rms} 为直流电压的方均根值。

3.4 快速电压变动

直流配电网中源荷功率的快速、连续变化将造成直流快速电压变动^[16,19-20](DC rapid voltage change, DRVC)。快速电压变动是一种随机的电压变动，在系统稳定的前提下，它在一定幅值波动范围内连续变化。

为沿用交流系统中快速电压变动的定义，采用 20 ms^[20]作为直流电压测量的“工频周期”来进行直流快速电压变动的相关分析，则 10 ms 相当于直流电压测量的“半周波”。由此，本文提出直流快速电压变动指标：相对电压变动量 d_{10ms} 、相对稳态电压变动值 d_c 和相对最大电压变动值 d_{\max} ，如式(13)所示，以描述直流配电网中快速电压变动大小。参照交流系统的快速电压变动曲线^[55]，给出直流系统的快速电压变动曲线，如图 8 所示。



(a) 电压方均根值变动曲线

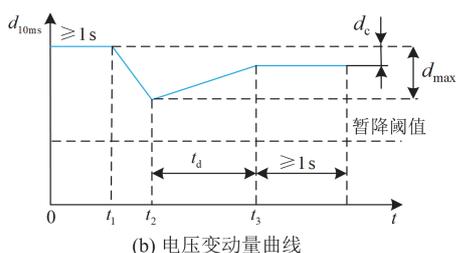


图 8 直流系统的快速电压变动曲线

Fig. 8 Rapid voltage change curve in DC system

$$\begin{cases} d_{10\text{ms}} = \frac{U_{10\text{ms}}}{U_{\text{DN}}} \times 100\% \\ d_c = \frac{\Delta U_c}{U_{\text{DN}}} \times 100\% \\ d_{\text{max}} = \frac{\Delta U_{\text{max}}}{U_{\text{DN}}} \times 100\% \end{cases} \quad (13)$$

式中: $U_{10\text{ms}}$ 为电压变动值; ΔU_c 为连续两个稳态条件下前一个稳态电压值减去后一个稳态电压值的差值; ΔU_{max} 为一个快速电压变动过程中相对于前一个稳态电压值的最大电压变动量。

文献[19-20]基于文献[33]中对交流快速电压变动的测量方法, 采用以 20 ms 为滑动窗口, 每 10 ms 刷新直流电压方均根值的方法对直流快速电压变动进行测量, 如式(14)所示。

$$U_{\text{rms}:10/20\text{ms}}(j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1+(j-1)\frac{N}{2}}^{(j+1)\frac{N}{2}} u_i^2} \quad (14)$$

式中: $U_{\text{rms}:10/20\text{ms}}(j)$ 为每 10 ms 更新测量到的 20 ms 内的第 j 个窗口的电压方均根值; N 为每 20 ms 内的采样点数; u_i 为第 i 次被采样到的电压波形的瞬时值; j 为被计算的窗口序号 ($j=1, 2, 3, \dots$), 即第一个值是在 20 ms 内(从样本 1 到样本 N)获得的, 下一个值则从样本 $1/2N+1$ 到样本 $1/2N+N$, 依次计算。

对直流配电网中的快速电压变动进行测量, 其测量方法如图 9 所示, 图中 $U_{\text{avg},100}$ 为连续 100 个的 $U_{\text{rms}:10/20\text{ms}}$ 的平均值。

在同一周期内, 将直流电压方均根值等效为产生相同热量的交流电压方均根值, 则直流电压可以视为交流电压的一种特殊形式, 那么对于直流快速电压变动的限值可以参考借鉴交流快速电压变动的限值要求。文献[56-57]在定义低压和中压交流配电网兼容水平时指出: 在正常情况下, 快速电压变动幅值应该被限制在 $\pm 3\%U_n$ 的范围内, 但也允许偶尔的阶跃电压超过 $3\%U_n$ 的情况。文献[58]对交流系

统的中压、高压以及超高压系统结合变动次数与相对稳态电压变动量给出了快速电压变动规划水平, 如表 7 所示。对于中压直流配电网, 该标准对直流快速电压变动的变动次数限值具有参考意义。

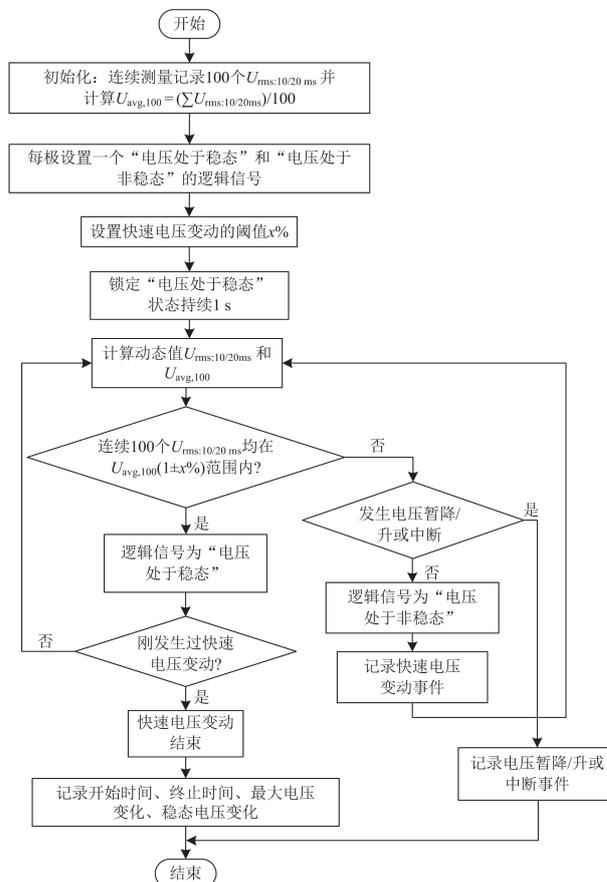


图 9 快速电压变动测量方法

Fig. 9 Rapid voltage change measurement method

表 7 IEC 61000-3-7 中快速电压变动规划水平

Table 7 Planning levels of rapid voltage change in

IEC 61000-3-7

变动次数 n_c	$(\Delta U/U_n)/\%$	
	中压	高压/超高压
$n_c \leq 4$ 次/天	5~6	3~5
4 次/天 $< n_c \leq 2$ 次/h	4	3
$2 < n_c \leq 10$ 次/h	3	2.5

针对低压交流电网设备引起的快速电压变动, 文献[59]从稳态电压变动量小于等于 3.3%、相对电压变动量超过 3.3%的持续时间小于等于 500 ms 以及相对最大电压变动量进行了约束。对于制订低压直流配电网的快速电压变动限值, 该标准具有参考意义。由于低压直流负荷多为敏感负荷, 对电压突然变化更加敏感^[17], 其抗干扰度较低, 建议直流快速电压

变动限值区间应相对交流的限值区间较窄一些。

3.5 电压闪变

电压波动造成灯光照度不稳定的人眼视觉反应称为闪变^[60]。直流供电的紧凑型荧光灯(compact fluorescent lamp, CFL)和 LED 等光源存在与交流系统类似的闪变问题^[61]。交流信号通过间谐波与闪变关联,而直流母线中的低频信号直接通过驱动传递到直流光源^[17]。直流电压波动的光-电关系模型尚未有研究提出,因此现有闪变仪模型的适用性有待探索。

根据文献[62-63]的建议,采用波动深度 F_{PF} 和闪变百分数对直流电压闪变的严重程度进行评估,如式(15)所示。

$$\begin{cases} F_{PF} = \frac{\Phi_{max} - \Phi_{min}}{\Phi_{max} + \Phi_{min}} \times 100\% \\ F_p = \frac{S_1}{S_1 + S_2} \times 100\% \end{cases} \quad (15)$$

式中: F_{PF} 为波动深度; Φ_{max} 、 Φ_{min} 分别为一个波动周期内光通量的最大值、最小值; S_1 、 S_2 分别为高于和低于平均光通量 Φ_{avg} 的区域面积; F_p 是指 Φ_{avg} 以上的区域面积(即 S_1 的面积)与全体面积比值(即 $S_1 + S_2$ 的面积)的百分数。

光通量的波动深度和波动频率会对人的视觉感受造成直接影响,闪变强度的大小受这两个因素直接影响。表 8 和表 9 分别表示无影响、低风险情况下波动频率与波动深度的关系。图 10 为光通量随时间的变化及闪变深度限值,其中图 10(b)将限值区间分为 3 个,分别为无影响、低风险和高风险^[64]。通过对不同频率信号下波动深度划分限值区间,实

表 8 无影响情况下波动频率与波动深度的关系

Table 8 Relationship between fluctuation frequency and fluctuation depth without influence

波动频率 f/Hz	波动深度/%
$f \leq 9$	$F_{PF} \leq 0.288$
$9 < f \leq 3125$	$F_{PF} \leq f \times 0.08/2.5$
$f > 3125$	无影响

表 9 低风险情况下波动频率与波动深度的关系

Table 9 Relationship between fluctuation frequency and fluctuation depth under low risk conditions

波动频率 f/Hz	波动深度/%
$f \leq 10$	$F_{PF} \leq 0.08$
$10 < f \leq 1250$	$F_{PF} \leq f \times 0.08$
$f > 1250$	无影响

现了对直流闪变严重程度的有效观测,为电压波动的治理提供了依据。

对直流配电网闪变的测量方法还处于探索研究阶段,目前,未见 IEC 提出直流配电网闪变测量方法的相关标准。对于直流闪变的测量,主要存在两种观点,即是否继续沿用 IEC 闪变仪,对此文献[65-66]分别给出了各自的直流闪变测量方法。

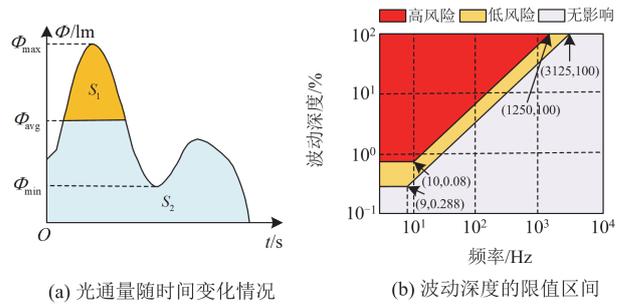


图 10 光通量随时间的变化及闪变深度限值

Fig. 10 Luminous flux over time and flicker depth limited values

文献[65]沿用 IEC 闪变仪的原理,视直流配电网为交流系统的特例,即将直流配电网视为额定频率为 0 的交流系统。该文献将 IEC 61000-4-15 所规定的交流系统的闪变测量方法引入到直流配电网,采用去平方解调改进方法测量直流闪变,如图 11 所示, P_{st} 为短时闪变值。该方法简化了闪变的测量环节,避免了因平方解调引起的附加误差,提高了闪变测量的准确度。

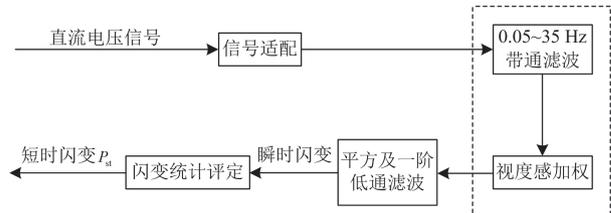


图 11 直流系统闪变测量功能框图

Fig. 11 Flicker measurement function diagram of DC system

考虑到 IEC 闪变仪对直流光源的应用可能存在局限性,文献[66]通过闪变仪分解模型实验平台来获取指定间谐波(非 50 Hz 整数倍频次)电压条件下 CFL 和 LED 的光通量波动深度,利用数学回归分析的方法建立间谐波电压参数与光通量波动深度信号之间的函数关系,如式(16)所示,通过该函数关系可计算出不同电压参数下的波动深度,参考波动频率与波动深度的关系(表 8 和表 9)便可进行评估分析。

$$F_{PF} = f(m_{ih} \cdot f_{ih}) \quad (16)$$

式中: m_{ih} 为间谐波含量; f_{ih} 为间谐波频率。

4 事件型直流电能质量

4.1 电压暂降及短时中断

直流母线短路、微源功率突变、大容量直流负荷投切、交流电网扰动等均可造成直流电压暂降甚至中断^[17]。电压暂降易造成电子工业用户的敏感设备故障、导致工业用户巨大的经济损失^[67]。

文献[68]中对交流电压暂降的定义为：电力系统中某点工频电压方均根值突然降低至 0.1~0.9 p.u., 并在短暂持续(10 ms~1 min)后恢复正常的现象。对于交流电压短时中断的定义为：电力系统中某点工频电压方均根值突然降低至 0.1 p.u.以下, 并在短暂持续(10 ms~1 min)后恢复正常的现象。文献[5]借鉴文献[68]的定义, 给出了直流电压暂降和短时中断的定义：直流电压暂降一般持续(10 ms~1 min), 电压下降幅值一般为标称电压的 10%~90%。若直流母线电压降低至标称电压的 10%以下, 则为直流电压短时中断。

为在电压幅值上区分电压偏差和电压暂降, 结合直流电压暂降的定义和文献[22], 修正低压直流配电网电压暂降阈值的下限为 0.8 p.u.。本文定义低压直流配电网中的电压暂降为：直流配电网中某点直流电压幅值突然降低至 0.1~0.8 p.u., 并在短暂持续(10 ms~1 min)后恢复正常的现象。定义短时中断为：直流配电网中某点直流电压幅值突然降低至 0.1 p.u.以下, 并在短暂持续(10 ms~1 min)后恢复正常的现象。电压暂降与中断示意图如图 12 所示, 图中 $u(t)$ 为直流电压幅值; u_d 为直流参考电压。

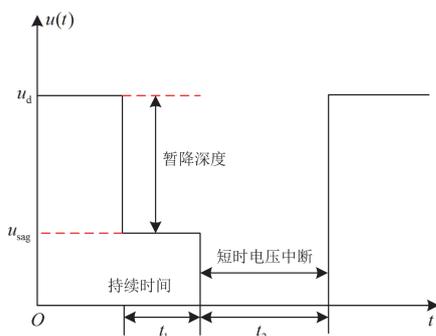


图 12 电压暂降与中断示意图

Fig. 12 Voltage dip and interruption diagram

电压暂降也是直流配电网典型电能质量现象之一, 用暂降深度对电压暂降的严重程度进行评估, 如式(17)所示。

$$M_F = \frac{u_{\text{sag}}}{U_{\text{DN}}} \times 100\% \quad (17)$$

式中: M_F 为暂降深度; u_{sag} 为暂降发生后直流电压

实际测量值。

对于直流电压暂降的测量, 文献[19-20]基于文献[33]对交流电压暂降的测量方法, 以 20 ms 为滑动窗口, 每 10 ms 刷新直流电压方均根值, 如式(14)所示, 如此反复。根据 $U_{\text{rms},10/20\text{ms}}$ 判断事件的发生与结束, 事件期间全程录波。

文献[53]给出了高压直流电压容限包络曲线, 如图 13 所示, 由于目前缺乏对中低压直流配电的电压容限水平的研究, 该曲线对制订中低压直流电压容限曲线具有参考意义。

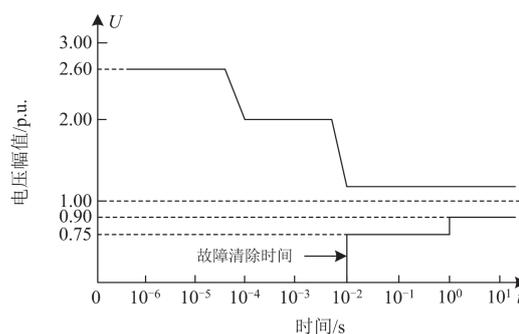


图 13 高压直流电压容限包络曲线

Fig. 13 HVDC voltage tolerance envelope curve

低压直流配电网中的负荷如变频器、直流电机、精密机械工具和可编程逻辑控制器等敏感负荷对电压的突然变化更加敏感, 对停电次数与停电时间有较高要求^[69], 因此对低压直流母线的电压要求应更加严格^[17], 其电压容限包络线的区域应更为狭窄。

4.2 过电压

在直流配电网中, 过电压分为持续过电压^[31]和短时过电压。持续过电压是实际运行电压超过电压标称值的 1.1 倍并维持一定的时间, 通常为 1 min^[31], 而短时过电压主要描述的是直流电压的突变现象。某直流测试平台的瞬态扰动实测波形如图 14 所示。本文借鉴文献[32]对交流系统提出的瞬态过电压和暂时过电压定义, 并结合文献[70]对交流系统中瞬变现象的描述, 给出了直流配电网中短时过电压的相关定义。

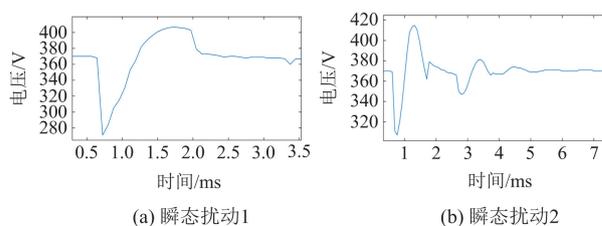


图 14 某直流测试平台中的瞬态扰动现象实测波形

Fig. 14 Measured waveform of transient disturbance phenomenon in a DC test platform

4.2.1 瞬态过电压

瞬态过电压是持续时间数毫秒或更短、通常带有强阻尼的振荡或无振荡的一种过电压^[32,70]，概念与文献[16]描述的电压浪涌一致。对于瞬变现象可简单理解为：变量的部分变化，且从一种稳定状态过渡到另一种稳定状态的过程中该变化逐渐消失的现象。根据图 14 的实测波形和相关研究，将瞬态过电压划分为瞬变冲击和瞬变振荡，电压波形如图 15 所示^[16,50]，其中： U_m 为最大幅值； Δt 为持续时间。

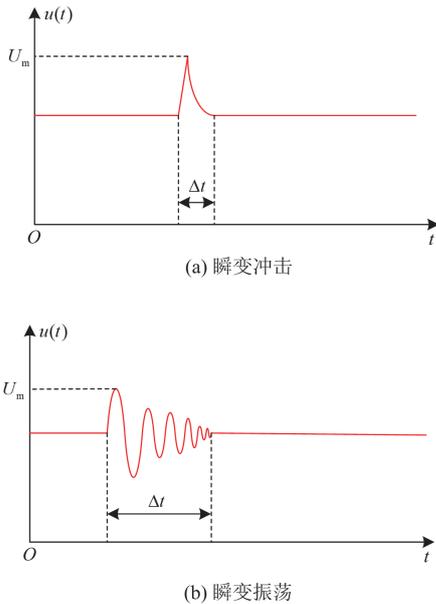


图 15 瞬态过电压示意图

Fig. 15 Transient overvoltage diagram

1) 瞬变冲击：直流电压单极性的突然变化现象。通常用上升和衰减时间或频谱成分来表现冲击性瞬变的特性。引起瞬变冲击的主要原因是雷电冲击或者投切感性负荷^[50]。

2) 瞬变振荡：直流电压有正负极性的突然变化现象。对于迅速改变瞬时值极性的电压振荡问题，借鉴文献[70]对交流系统的频谱成分、持续时间和幅值大小描述，对直流电压频谱也可划分为高频(0.5~5 MHz)、中频(5~500 kHz)和低频(< 5 kHz)。引起瞬变振荡的主要原因是雷电冲击或者是投切容性负荷^[50]。

4.2.2 暂时过电压

暂时过电压是持续时间相比瞬态过电压较长的不衰减或弱衰减的一种过电压^[32]，现象上与电压暂升一致。源荷突发变化、突然断电和重合闸、短路故障以及外部干扰都可能引起直流暂时过电压，暂时过电压如图 16 所示。

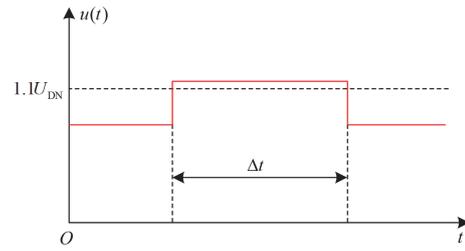


图 16 暂时过电压示意图

Fig. 16 Temporary overvoltage diagram

现代电子器件的集成度越来越高，但抗瞬态过电压的能力却在下降^[16]。在大多数情况下，瞬态过电压会损坏电路元件，其损坏的程度与元件的耐受程度和电路中的功率流动密切相关。抑制直流配电网中的过电压现象，有利于降低设备受损程度，提高设备的使用寿命。

综上所述，本文根据相关文献对直流配电网电能质量指标进行总结，并基于相关研究将衡量电压偏差、快速电压变动以及过电压等现象的部分指标补充到当前直流配电网电能质量指标体系中。直流配电网电能质量指标总结如表 10 所示。

表 10 直流配电网电能质量指标总结

Table 10 Summary of power quality indices of DC distribution network

现象	指标	
电压偏差	双极电压偏差百分数 ^[39] 、节点电压偏差百分数	
电压不平衡	电压不平衡度 ^[15,17,42-47]	
纹波	纹波峰值系数 ^[15,19-20,50-51] 、纹波有效值系数 ^[15,19-20,51] 、纹波电压含有率 ^[17,30-31]	
快速电压变动	相对电压变动量、相对稳态电压变动值、相对最大电压变动值	
电压闪变	波动深度、闪变百分数 ^[17,62-64]	
电压暂降及短时中断	暂降深度、持续时间 ^[17,30]	
持续过电压	过电压倍数、持续时间 ^[31]	
短时过电压	瞬变冲击	
	瞬变过电压	上升和衰减时间、频谱成分
	瞬变振荡	频谱成分、持续时间、幅值大小
暂时过电压 (也称电压暂升)	暂升幅值、持续时间	

5 总结与展望

本文首先介绍了直流配电网接线结构、电压等级范围以及换流器的控制方式，然后从直流配电网电能质量指标的定义、扰动产生机理、测量方法和指标限值等方面进行总结和论述。介绍了电压偏差、

电压不平衡、电压纹波、快速电压变动、电压闪变、电压暂降和过电压等现象的扰动产生机理。借鉴 IEC 61000-6-30 等标准对交流电能质量的测量方法以及相关文献研究,给出了直流配电网电能质量指标测量的推荐方法。根据相关标准和文献对其指标的限值进行归纳与分析,为直流配电网电能质量指标限值的制订提供参考依据。通过对直流配电网电能质量现象的扰动机理、测量方法和指标限值全面调研和深入分析可知,该领域在以下方面还有待进一步开展研究。

1) 直流配电网呈现高度电力电子化,非线性扰动现象突出,向宽频带动态演变,面对这一发展趋势,以下这些问题有待深入研究:分析直流配电网中的设备以及外在因素对电能质量的影响机理,以揭示其扰动现象的内在规律;利用先进的信号处理技术,如小波变换、经验模态分解等,对宽频带动态演变的扰动信号进行有效提取和分析,实现电能质量扰动特征的提取与量化分析评估;完善直流配电网电能质量关键扰动类型,建立全面、完整的直流配电网电能质量指标体系,从而为直流配电网提供统一的标准和准则奠定基础。对于直流配电网电能质量扰动现象的研究,需要确保直流数据采集的准确性和完整性,以便真实反映直流配电网电能质量状况;选择合适的分析工具和算法,以提高扰动特征提取和量化分析的精度和效率。

2) 目前直流配电网电能质量的测量方法尚未明确,部分标准和文献更倾向于建议采用 20 ms 作为直流参数的测量“工频周期”,以便于沿用交流电能质量的测量与评估方法。明确直流配电网电能质量指标测量方法,有助于监测和评估直流配电网的电能质量。以下为直流配电网电能质量测量方法的几个关键研究方向:借鉴交流系统的测量方法,结合直流配电网的实际需求,并充分考虑两者之间的差异,形成一套既科学又实用的直流配电网电能质量测量方法;开发适用于直流配电网的电能质量监测装置,该装置应具备高精度、快速响应的特点,并探索适用于直流配电网不同场景下的测量周期和采样率,从而实现准确、实时捕捉直流参数的变化。同时需要注意以下几点:保证测量方法的合理性,避免由于测量方法的不合理导致对直流配电网电能质量评估的误导;重视测量仪器精度对测量结果的影响,确保所采用的测量仪器能够满足直流配电网电能质量测量的精度要求;关注测量方法的实时性和高效性,以满足直流配电网在线监测和评估的需求。

3) 明确直流电能质量指标限值,有助于为直流配电网及其设备安全可靠运行提供评估依据。在制

订直流电能质量指标限值时,需要重点考虑设备的发射特性与耐受能力的兼容水平,可通过收集并分析大量实际运行数据,了解设备在不同扰动现象下的性能表现;建立直流配电网并网设备对纹波、暂降及瞬态过电压等扰动现象的耐受能力概率评估模型,通过该模型可以更为准确地评估设备在不同电能质量条件下的耐受能力,为制订限值提供科学依据;制订限值要兼顾经济性和设备的安全性,过于严格的指标限值可能导致设备成本增加或技术难度加大,而过于宽松的限值可能无法满足基本的电能质量要求,因此需要找到一个平衡点,确保制订的限值既符合经济性要求,又能满足设备的安全运行需求;制订不同直流配电网场景的相应指标限值将是未来的重点研究内容,这要求对各个直流配电网场景进行充分的调研,确保制订的限值符合实际应用需求。对于直流配电网电能质量指标限值的研究,需要注意的是,评估模型的建立应基于大量真实、有效的数据,确保模型能够真实反映设备的性能特点;不断跟进新技术和新设备的发展,及时更新评估模型,以适应不断变化的直流配电网运行环境。总之,通过深入研究设备的特性与性能、综合考量经济性和安全性以及差异化制订指标限值等研究思路 and 方案,有望为直流配电网电能质量提供更为科学、合理的评估依据。

本文对直流配电网电能质量指标体系进行了规范化的完善,并分析了其指标的扰动产生机理,对其指标的测量方法和限值要求进行归纳与阐述,有助于促进直流配电网电能质量相关领域的研究,为进一步探索直流配电网电能质量体系标准化提供思路。

参考文献

- [1] 李霞林,郭力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [2] 马钊,赵志刚,孙媛媛,等. 新一代低压直流供用电系统关键技术及发展展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 12-22.
MA Zhao, ZHAO Zhigang, SUN Yuanyuan, et al. Key technologies and development prospect of new generation low-voltage DC power supply and utilization system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 12-22.
- [3] 梁永亮,吴跃斌,马钊,等. 新一代低压直流供用电系统在“新基建”中的应用技术分析和发展展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 13-24.
LIANG Yongliang, WU Yuebin, MA Zhao, et al. Application

- and development prospect of new generation of LVDC supply and utilization system in “new infrastructure”[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 13-24.
- [4] 唐西胜. GB/T 35727—2017《中低压直流配电电压导则》解读[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 23-28.
TANG Xisheng. Interpretation of GB/T 35727—2017 guideline for standard voltages of medium and low voltage DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 23-28.
- [5] 王强钢, 周亦尧, 廖建权, 等. 直流配电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 193-207.
WANG Qianggang, ZHOU Yiyao, LIAO Jianquan, et al. Review on power quality in DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 193-207.
- [6] 严胜, 罗湘, 贺之渊. 直流电网核心装备及关键技术展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 205-215.
YAN Sheng, LUO Xiang, HE Zhiyuan. Prospect of core equipment and key technology for DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 205-215.
- [7] 韩民晓, 谢文强, 曹文远, 等. 中压直流配电网应用场景与系统设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 2-11.
HAN Minxiao, XIE Wenqiang, CAO Wenyuan, et al. Application scenarios and system design of medium-voltage DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 2-11.
- [8] 陈勃旭, 崔炜, 陈宇, 等. 分布储能直流微电网中多储能荷电均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 111-120.
CHEN Boxu, CUI Wei, CHEN Yu, et al. Charge balance control strategy for multiple energy storage in a distributed energy storage DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 111-120.
- [9] 陈旭, 皇金锋, 李聪林. 双极性直流微电网的改进型高阶滑模自抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 111-122.
CHEN Xu, HUANG Jinfeng, LI Conglin. Improved high-order sliding mode active disturbance rejection control for bipolar DC microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 111-122.
- [10] 黄崇鑫, 陈振宇, 邓松. 含储能双母线直流微电网电压和功率协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 141-149.
HUANG Chongxin, CHEN Zhenyu, DENG Song. Voltage-power coordinated control of a dual-bus DC microgrid with energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 141-149.
- [11] 张琳, 谢洪途, 赵路路, 等. 混合能源直流微电网能源优化管控策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 141-151.
ZHANG Lin, XIE Hongtu, ZHAO Lulu, et al. Energy optimization and control strategy for a hybrid energy DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 141-151.
- [12] 姜淞瀚, 彭克, 徐丙垠, 等. 直流配电系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 219-231.
JIANG Songhan, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Current situation and prospect of demonstration projects of DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 219-231.
- [13] 黄兢业, 栗惠, 陈雪琴, 等. 低压直流国内外标准化综述[J]. 电器与能效管理技术, 2018(22): 6-11.
HUANG Jingye, LI Hui, CHEN Xueqin, et al. Review of domestic and international standardization of low voltage direct current[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(22): 6-11.
- [14] 陈鹏伟, 肖湘宁, 陶顺. 直流微网电能质量问题探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 148-158.
CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, TAO Shun. Discussion on power quality problems for DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 148-158.
- [15] 周文, 苏灿, 胡雪凯, 等. 直流配电系统电能质量探析[J/OL]. 电源学报: 1-14[2024-01-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230224.1111.004.html>.
ZHOU Wen, SU Can, HU Xuekai, et al. Analysis of power quality in DC distribution system[J/OL]. Journal of Power Supply: 1-14[2024-01-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230224.1111.004.html>.
- [16] IEC. LVDC systems-assessment of standard voltages and power quality requirements: IEC TR 63282-2020[S]. Geneva: IEC, 2020.
- [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] 姚钢, 纪飞鹏, 殷志柱, 等. 直流配电电能质量研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 163-170.
YAO Gang, JI Feipeng, YIN Zhizhu, et al. Review on the research of DC power distribution power quality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 163-170.
- [19] BARROS J, APRAÍZ M DE, DIEGO R I. Definition and measurement of power quality indices in low voltage DC

- networks[C] // 2018 IEEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), September 26-28, 2018, Bologna, Italy: 1-5.
- [20] BARROS J, APRAÍZ M D E, DIEGO R I. Power quality in DC distribution networks[J]. *Energies*, 2019, 12(5): 848.
- [21] DOERRY N, AMY J. DC voltage interface standards for naval applications[C] // 2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium(ESTS), June 21-24, 2015, Old Town Alexandria, VA, USA: 318-325.
- [22] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 中低压直流配电电压导则: GB/T 35727—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Technical Committee for Standardization for Voltage and Current Grades and Frequency. Guideline for standard voltages of medium and low voltage DC distribution system: GB/T 35727—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [23] 吴盛军, 王益鑫, 李强, 等. 低压直流供电技术研究综述[J]. *电力工程技术*, 2018, 37(4): 1-8.
- WU Shengjun, WANG Yixin, LI Qiang, et al. Review of low voltage DC power supply technology[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(4): 1-8.
- [24] 段建东, 魏朝阳, 周一, 等. 未来直流配电网电压等级序列研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(12): 3538-3545.
- DUAN Jiandong, WEI Zhaoyang, ZHOU Yi, et al. Research on voltage level sequence of future DC distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(12): 3538-3545.
- [25] 盛万兴, 李蕊, 李跃, 等. 直流配电电压等级序列与典型网络架构初探[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(13): 3391-3403.
- SHENG Wanxing, LI Rui, LI Yue, et al. A preliminary study on voltage level sequence and typical network architecture of direct current distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(13): 3391-3403.
- [26] 吴在军, 谢兴峰, 杨景刚, 等. 直流配电网电压控制技术综述[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(2): 59-67.
- WU Zaijun, XIE Xingfeng, YANG Jinggang, et al. A review on voltage control strategies in DC distribution network[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(2): 59-67.
- [27] 季一润, 袁志昌, 赵剑锋, 等. 一种适用于柔性直流配电网的电压控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(2): 335-341.
- JI Yirun, YUAN Zhichang, ZHAO Jianfeng, et al. A suitable voltage control strategy for DC distribution power network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(2): 335-341.
- [28] 李盈含, 高亮. 基于下垂特性的柔性直流配电系统控制策略[J]. *现代电力*, 2020, 37(4): 391-399.
- LI Yinghan, GAO Liang. Control strategy of flexible DC distribution system based on droop characteristics[J]. *Modern Electric Power*, 2020, 37(4): 391-399.
- [29] 肖湘宁, 徐永海, 陶顺. 电力系统电能质量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [30] 吕海霞. 直流配电网电能质量分析与评估[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- LÜ Haixia. Analysis and evaluation of power quality of DC distribution network[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [31] 焦晋荣. 直流配电网电能质量问题分析及扰动检测[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- JIAO Jinrong. Analysis of power and disturbance detection in DC distribution network[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [32] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量 暂时过电压和瞬态过电压: GB/T 18481—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- National Technical Committee for Standardization for Voltage and Current Grades and Frequency. Power quality-temporary and transient overvoltages: GB/T 18481—2001[S]. Beijing: Standards Press of China, 2001.
- [33] IEC. Electromagnetic compatibility (EMC)-part 4-30: testing and measurement techniques-power quality measurement methods: IEC 61000-4-30: 2015[S]. Geneva: IEC, 2015.
- [34] LEE J O, KIM Y S, MOON S I. Current injection power flow analysis and optimal generation dispatch for bipolar DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(3): 1918-1928.
- [35] LEE J O, KIM Y S, JEON J H. Optimal power flow for bipolar DC microgrids[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 142.
- [36] CHEW B S H, XU Y, WU Q. Voltage balancing for bipolar DC distribution grids: a power flow based binary integer multi-objective optimization approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(1): 28-39.
- [37] SEPÚLVEDA-GARCÍA S, MONTOYA O D, GARCÉS A. A second-order conic approximation to solving the optimal power flow problem in bipolar DC networks while considering a high penetration of distributed energy resources[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2024, 155.
- [38] ZHOU Y, WANG Q, HUANG T, et al. Convex optimal power flow based on power injection-based equations and its application in bipolar DC distribution network[J]. *Electric Power Systems Research*, 2024, 230.

- [39] 管尚书. 双极性直流配电网电压电流控制及多目标潮流优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
GUAN Shangshu. Research voltage and current control and multi-objective power flow optimization of bipolar DC distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [40] 王丹, 柳依然, 梁翔, 等. 直流配电网电压等级序列研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 19-25.
WANG Dan, LIU Yiran, LIANG Xiang, et al. DC distribution network voltage class series[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 19-25.
- [41] 韩民晓, 陈宇, 王皓界. 直流配电系统电压偏差限值的研究[J]. 大功率变流技术, 2016(3): 1-5.
HAN Minxiao, CHEN Yu, WANG Haojie. Research on the limitation value of voltage deviation for DC distribution system[J]. High Power Converter Technology, 2016(3): 1-5.
- [42] 陶顺, 马喜欢, 管尚书, 等. 真双极直流配电网有功-电压分布式二级控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 50-57.
TAO Shun, MA Xihuan, GUAN Shangshu, et al. Distributed secondary power and voltage control strategy for a true bipolar DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 50-57.
- [43] JUNG T H, GWON G H, KIM C H, et al. Voltage regulation method for voltage drop compensation and unbalance reduction in bipolar low-voltage DC distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 141-149.
- [44] 廖建权, 周念成, 王强钢. 辐射型双极直流配电网不平衡电压分析及抑制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5380-5388.
LIAO Jianquan, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang. Analysis and suppression of unbalanced voltage in radiant bipolar DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5380-5388.
- [45] GUO Chunsheng, LIAO Jianquan, ZHANG Yu. Adaptive droop control of unbalanced voltage in the multi-node bipolar DC microgrid based on fuzzy control[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022, 142.
- [46] LIAO Jianquan, LIU Yangtao, GUO Chunsheng, et al. Power quality of DC microgrid: index classification, definition, correlation analysis and cases study[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2024, 156.
- [47] 韩民晓, 谢文强, 王超. 直流配电网中电能质量问题初探[J]. 中国标准化, 2019(5): 125-130.
HAN Minxiao, XIE Wenqiang, WANG Chao. Research on power quality problems in DC distribution network[J]. China Standardization, 2019(5): 125-130.
- [48] ANSI. American national standard for electric power systems equipment-voltage ratings (60 Hertz): ANSI C84.1-2020[S]. Washington, DC: ANSI, 2020.
- [49] 焦晋荣, 贾清泉, 王宁, 等. 柔性直流配电网纹波形成机理与叠加特性[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1726-1733.
JIAO Jinrong, JIA Qingquan, WANG Ning, et al. Ripple formation mechanism and superimposition characteristics for flexible DC distribution network[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1726-1733.
- [50] VAN DEN BROECK G, STUYTS J, DRIESEN J. A critical review of power quality standards and definitions applied to DC microgrids[J]. Applied Energy, 2018, 229: 281-288.
- [51] 朱明星, 闫奎龙. 直流配电网纹波测量方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(16): 59-64.
ZHU Mingxing, YAN Kuilong. Ripple measurement method of DC distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(16): 59-64.
- [52] 全国电磁兼容标准化技术委员会. 电磁兼容 试验和测量技术直流电源输入端口纹波抗扰度试验: GB/T 17626.17—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
National Technical Committee for Standardization for Electromagnetic Compatibility. Electromagnetic compatibility: electromagnetic compatibility-testing and measurement techniques-ripple on DC input power port immunity test: GB/T 17626.17—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [53] IEEE. Recommended practice for 1 kV to 35 kV medium-voltage DC power systems on ships: IEEE Std 1709—2018[S]. New York: IEEE, 2018.
- [54] IEEE. IEEE standard for DC microgrids for rural and remote electricity access applications: IEEE Std 2030.10—2021[S]. New York: IEEE, 2021.
- [55] 陈聪, 陶顺, 陈鹏伟, 等. IEC 标准的快速电压变动测量方法解读与对比[J]. 电测与仪表, 2016, 53(18): 35-40.
CHEN Cong, TAO Shun, CHEN Pengwei, et al. Rapid voltage changes detection and analysis methods based on IEC standard[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(18): 35-40.
- [56] IEC. Electromagnetic compatibility (EMC)-part 2-2: environment-compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low voltage power supply systems: IEC 61000-2-2: 2002[S]. Geneva: IEC, 2002.
- [57] IEC. Electromagnetic compatibility (EMC)-part 2-12:

- environment-compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public medium-voltage power supply systems: IEC 61000-2-12: 2003[S]. Geneva: IEC, 2003.
- [58] IEC. Electromagnetic compatibility (EMC)-part 3-7: limits-assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems: IEC 61000-3-7: 2008[S]. Geneva: IEC, 2008.
- [59] IEC. Electromagnetic compatibility (EMC)-part 3-3: limits-limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low voltage supply systems, for equipment with rated current ≤ 16 A per phase and not subject to conditional connection: IEC 61000-3-3: 2013[S]. Geneva: IEC, 2013.
- [60] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量 电压波动和闪变: GB/T 12326—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
National Technical Committee for Standardization for Voltage and Current Grades and Frequency. Power quality-voltage fluctuation and flicker: GB/T 12326—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [61] 李扬帆. 紧凑型荧光灯和 LED 灯电能质量扰动特性与敏感特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
LI Yangfan. Research on the power quality disturbance characteristic and sensitivity characteristic of compact fluorescent lamps and LED lamps[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [62] 全国建筑节能标准化技术委员会. LED 室内照明应用技术要求: GB/T 31831—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
National Technical Committee for Standardization for Building Energy Efficiency. Technical requirements for application of LED indoor lighting: GB/T 31831—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [63] IEEE. Recommended practices for modulating current in high-brightness LEDs for mitigating health risks to viewers: IEEE PAR 1789[S]. New York: IEEE, 2015.
- [64] 陈朝迁. 直流配电网电能质量分析与治理措施研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
CHEN Chaoqian. Research on power quality analysis and control measures of DC distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [65] 苏灿, 周文, 胡雪凯, 等. 直流配电系统闪变检测方法研究[J/OL]. 高压电器: 1-9[2023-12-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.TM.20231018.1320.002.html>.
SU Can, ZHOU Wen, HU Xuekai, et al. Study on flicker detection measurement method at DC distribution system[J/OL]. High Voltage Apparatus: 1-9[2023-12-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.TM.20231018.1320.002.html>.
- [66] 彭庆宇. 常用照明光源光闪变模型的实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
PENG Qingyu. Experimental study of light flicker model for common light sources[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [67] 郭成, 代剑波, 杨灵睿, 等. 基于 ISGMD-DHT 的电压暂降特征提取方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 70-79.
GUO Cheng, DAI Jianbo, YANG Lingrui, et al. A voltage sag feature extraction method based on ISGMD-DHT[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 70-79.
- [68] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量 电压暂降与短时中断: GB/T 30137—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
National Technical Committee for Standardization for Voltage and Current Grades and Frequency. Power quality-voltage dips and short interruptions: GB/T 30137—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [69] 唐巍, 王辰, 张璐, 等. 考虑敏感负荷需求和直流故障恢复能力的交直流混合配电网开关配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 210-218.
TANG Wei, WANG Chen, ZHANG Lu, et al. Switch allocation of AC/DC hybrid distribution network considering requirements of sensitive loads and DC fault restoration ability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 210-218.
- [70] IEEE. Recommended practice for monitoring electric power quality: IEEE Std 1159—2009[S]. New York: IEEE, 2009.

收稿日期: 2024-04-16; 修回日期: 2024-07-20

作者简介:

张智(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流配电网电能质量; E-mail: zeno99zhi@126.com

徐永海(1966—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量分析与控制、新能源电力系统。E-mail: yonghaixu@263.net

(编辑 周金梅)