DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.5.185 **中图分类号**：TM711 **文献标志码**：A

直流配电系统电能质量探析

周 文[1](中国电源学会会员)，苏 灿[1]，胡雪凯[1](中国电源学会会员)，闫 鹏[1]，
孟 良[1]，刘军成[2](中国电源学会高级会员)
(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：直流配电系统因其可控性好、高效可靠、更适应可再生能源接入等优势，已经成为未来配电系统的发展方向。直流配电网因其源荷特性、扰动来源、运行机理与交流配电网不同，其电能质量问题也呈现了新的特点。面对应用日益广泛的直流配电系统，介绍了其典型拓扑结构及接地方式；结合其运行特征，分析了直流配电系统运行中可能存在的各类电能质量现象，包括电压带、纹波、不平衡、闪变、电压暂降(短时中断)、电压暂升等，提出了表征直流配电系统电能质量的主要技术指标。算例分析表明该系列指标能够定量描述直流配电系统的电能质量现象。最后，分析了未来直流配电系统电能质量问题的研究方向。旨在剖析直流配电系统电能质量现象，为开展广泛的直流配电电能质量监测、分析研究提供支持。

关键词：直流配电；电能质量；电压带；纹波；指标

Analysis of Power Quality of DC Distribution System

ZHOU Wen[1], *Member*, *CPSS*, SU Can[1], HU Xuekai[1], *Member*, *CPSS*, YAN Peng[1], MENG Liang[1],
LIU Juncheng[2], *Senior Member*, *CPSS*
(1. Electric Power Research Institute, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China; 2. Xi'an Boyuu Electric Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: Owing to its advantages of good controllability, high efficiency and reliability, and adaptability to the connection of renewable energy resources, the direct current (DC) distribution system has become the development direction of next-generation power distribution systems. The characteristics of energy resources and loads, disturbance resources, and operation mechanism of DC distribution networks are different from those of alternating current (AC) distribution networks, which lead to new features of power quality issues. Aimed at the widespread applications of DC distribution systems, their typical topologies with the corresponding grounding modes are introduced. With the combination of operation characteristics, the phenomena of various possible power quality issues in DC distribution systems are analyzed, including voltage band, ripples, imbalance, flicker, voltage dip (short-time interruption) and voltage swell. In addition, the main technical indices that can be used to describe the power quality of DC distribution systems are proposed. The results of an example demonstrate that these indices can well quantitate the related power quality phenomena. Finally, the research directions for power quality issues in DC distribution systems in the future are also discussed. The research aims to analyze the power quality issues in DC distribution systems in depth, providing support for the comprehensive power quality measurement and analysis of DC distribution systems.

Keywords: Direct current (DC) distribution; power quality; voltage band; ripple; index

近年来，随着分布式发电的快速发展以及电力电子变换技术的进步与成本降低，越来越多的直流配电项目投入商业运营，直流配电议题受到了世界各国的广泛关注[1-4]。概括而言，从交流配电网到直流配电网的驱动力主要表现为：①政治层面，气候变化议题、节能减排政策；②技术层面，电

收稿日期：2022-08-25；**修回日期**：2022-10-31，2022-11-24；
录用日期：2023-01-19；**网络首发日期**：2023-02-24

力电子技术的发展使得直流配电成为可能；③用户层面，家用电器和工业电器的直流用电趋势，例如LED灯、电动汽车等；④电源层面，电源的直流化趋势，例如新能源发电、储能等。

在我国，直流配电的相关研究和建设也步入快速发展的阶段。例如我国第一个直流配电工程在苏州同里建设运行；特别地，作为高质量起点的雄安新区，在建和规划了一批不同层次的直流示范项目。2017 年 12 月，我国也发布了首部直流配电网电压导则(GB/T 35727—2017)。

在欧洲，为了便于实践中定量描述直流配电的优点并正确表征直流配电系统的电能质量扰动水平，2021 年 1 月启动了“直流电网测量标准化(standardization of measurements for DC electricity grids)”项目，其目的在于解决目前直流配电系统缺乏电能质量现象及其指标描述、电能质量测量方法、直流配电网电磁兼容 EMC(electromagnetic compatibility)水平及规划水平、电能质量危害分析、电压电流测量溯源等问题，为直流配电系统的设计、运行、维护提供指导。项目计划 2023 年底完成，主要内容包括：①开发适用于低压直流配电网现场测量的监测设备，要求在纹波等各类扰动情况下测量误差不大于 0.1%；②通过对现场测量数据的分析，研究定义直流配电网电能质量现象及其对应指标，研究适用于直流配电网电表测试的波形形状，开发适用于直流配电网电能质量测试及电能测试的参考系统(reference system)；③规定适用于诸如冲击电流、电压暂降、纹波等电能质量现象的测量方法及测量设备技术规范，并开展直流配电网电能质量兼容水平、规划水平的观测分析；④为开展直流配电网电能质量标准化提供必要的数据、方法、导则、推荐等。该项目目前还没有公开的结果文件。

可见，目前国际范围内直流配电的研究还处于初步阶段，直流配电系统的建设、运行尚缺乏规范性的标准依据，直流配电系统电能质量干扰种类及其对各类电气设备的危害影响尚需要进一步研究。因此，如何确保直流配电系统高可靠运行、高质量供电仍然是 1 个需要切实面对的问题。文献[2]明确指出，电能质量问题是直流配电系统需要首先考虑的问题之一。特别地，考虑到直流配电系统的具体特征，如电阻性网络特征、低惯性电源特征、低抗扰度电力电子器件特征等，各类电能质量扰动在直流配电系统中传播更快，影响范围更大。遗憾的是，就直流配电系统电能质量议题而言，目前尚缺乏对其现象、危害、技术指标的系统性研究及相关标准，更无法分析研究各类电能质量扰动的合理范围。

据此，本文针对直流配电系统的电能质量问题展开分析。首先，介绍直流配电系统的电压等级、典型拓扑结构及其接地方式；其次分析直流配电系统运行中可能存在的各类电能质量问题；在此基础上提出了描述直流配电系统电能质量现象的主要技术指标，并进行了算例分析，为后续定量开展直流配电网电能质量各类扰动的合理范围研究提供支撑；最后文章分析了直流配电系统电能质量研究面临的主要问题和解决方向。

1 直流配电系统

1.1 直流配电系统电压范围

文献[5]定义的直流配电系统为以直流方式实现与用户电气系统交换电能的配电系统，该标准将 3 kV(±1.5 kV)~±50 kV 定义为中压直流配电范畴，将 110 V~1 500 V(±750 V)划定为低压直流配电的范畴；文献[6]以船用直流供电系统为对象，将 1 kV~35 kV 划定为中压直流的范畴；文献[7-10]界定了 1 500 V 为低压直流配电系统的电压上限，但指出中压直流的电压范围仍在讨论中；文献[11]针对直流配电网电压等级问题，分析了现有交流配电网及直流配电网电压等级的约束原则，结合直流配电网发展需要考虑的因素及不同行业的特点，提出了 1 种适应未来直流配电网电压等级的确定方法，依此给出了直流配电网电压等级的推荐值序列：±0.4/0.75/1.5/6/10/24/55/100/320 kV。

综上，1 500 V 作为中低压直流电压等级的界限已经被业界普遍接受，但是中压直流配电的电压

范畴仍不统一。考虑到 1 500 V 电压等级的界定主要考虑了与低压交流 1 000 V 界定范围的配合(1 500 V≈$\sqrt{2}$ ×1 000 V)，便于在原有低压交流配电系统的基础上进行直流配电的改造和融合，按此思路，考虑到中压交流电压的界定电压为 35 kV，建议中压直流配电的电压上限为 50 kV(50 kV≈$\sqrt{2}$ × 35 kV)。顺便指出，在我国，目前在建及运行的直流配电的最高电压等级为±10 kV。

1.2 直流配电系统典型拓扑结构

结合目前在运行及在建的直流配电系统，其典型拓扑结构如图 1 和图 2 所示，主要包括单极系统和双极系统，其接地方式包括 TN 型式及 IT 型式 2 种方式。实际上，双极系统是由 2 个单极系统串联构成，与单极系统比较，不仅可以双极运行，也可以单极运行，既可以提供极对中线电压，也可以提供极间电压。

直流配电系统中单极和双极拓扑结构的选择主要根据实际需求，基于技术和经济两方面折中，考虑的因素包括供电容量的需求、传输距离因素、电压质量要求、电气设备用电电压等级要求、网络损耗、接地配合等。另外，与单极系统比较，双极系统运行过程中还存在不平衡问题，需要认真对待。

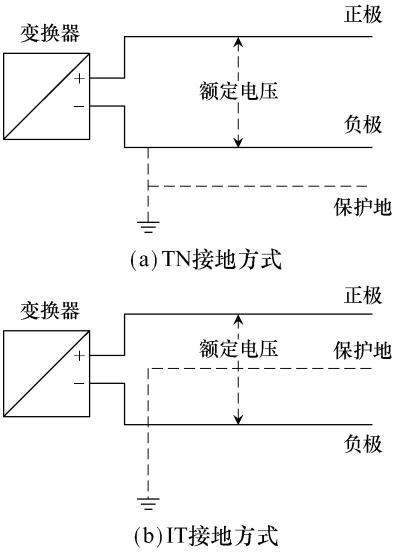
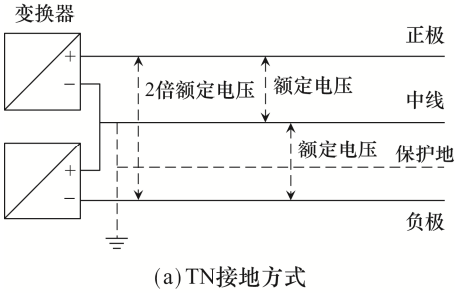


图 1　直流配电系统单极系统典型接线

Fig. 1 Typical wirings of unipolar DC distribution system



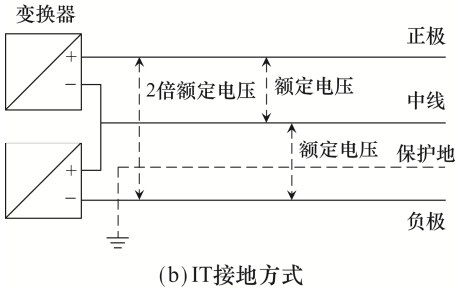


图 2　直流配电系统双极系统典型接线

Fig. 2 Typical wirings of bipolar DC distribution system

1.3 直流配电系统的接地

美国电气电子工程师学会 IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)所定义的合格电能质量指：给敏感设备提供的电力和设备的接地系统均适合于该设备正常工作[12]。可见，直流配电系统的接地方式对其供电质量及安全运行具有重要意义。

目前，常用的直流配电系统接地方式为 TN 或 IT 方式。文献[13]指出，直流配电接地型式的选择主要由系统电击防护性能与供电连续性的要求决定，尤以电击防护性能为重点。可见，这里的电击防护属于安全问题，而供电连续性则属于供电质量的范畴。

对于理想直流电源供电的配电系统，在相同的电压等级下，采用负极接地的 TN 接地型式比传统的交流系统具有更高的电压安全性能；与交流系统一样，直流 IT 系统同样具有很高的电气安全性能，但存在绝缘监测困难的问题。对于电源侧不接地的情况，交流系统因电缆普遍存在对地分布电容尚有容性漏电流通过，而直流系统几乎没有此类漏电流，因此，相较于交流系统而言，直流不接地的 IT 系统的绝缘监测更加困难，若不能准确监测，可能引起大范围的电能质量问题。

文献[14]分析了双极 IT 系统极对中性线短路问题，结果表明，此时健全极电压升高，最高可达到 1.5 倍额定电压，过高的电压将危及供电于健全极与中性线之间的负载安全运行。对于 TN 系统极对地故障或 IT 系统两点接地故障，随着接地电阻的升高接地点电位持续升高。许多国家或地区对接地电压升高有明确的限值，例如文献[15]指出，在芬兰，接地电压不得大于 240 V DC(是接触电压规定的 2 倍)。图 3 为某 750 V TN 型直流配电系统接地电压随接地电阻的变化曲线[1]，可见，在接地电阻较高的地区，建议采用 IT 系统。

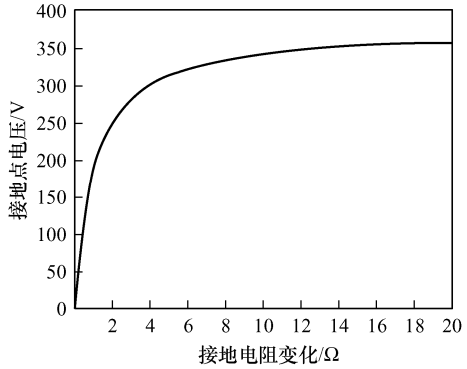


图 3 某 750 V TN 系统接地电压随接地电阻变化示意

Fig. 3 Schematic of grounding voltage of one 750 V TN system vs grounding resistance

基于上述分析，为了避免短路造成的供电不连续性问题而影响供电质量，在交流供电系统作为电源对直流配电系统供电的情况下，其交流侧变压器的中性点不得接地；同样，在直流配电系统内部，若负荷侧与直流配电系统无电气隔离，负荷侧也要采取 IT 接地方式。

2 直流配电系统电能质量问题分析

直流配电网电能质量现象、问题与直流配电网运行密切相关，也与直流配电网多变换器特征及其控制方式密切相关，是用以描述直流配电网运行的电压电流幅值特征及波形特征相较于理想直流配电网运行而言的偏离现象。本节侧重于结合直流配电网的运行控制分析其可能存在的各类电能质量现象。

2.1 电压偏差

系统运行电压的变化是界定电能质量现象及其危害的关键[16]。因此，研究直流配电系统电能质量问题首先要分析理解直流配电系统运行电压的变化规律。

2.1.1 基于控制方式的直流电压带

根据控制方式不同，直流配电系统可分为 2 种运行模式，即主动配电系统和被动配电系统。主动配电系统即具有控制分布式资源(如分布式发电、可控负载或储能等)能力的配电网。主动配电系统中几乎所有的电源、负载均通过可自行控制的电力电子装置接入直流母线，控制策略为下垂控制[17-18]。通过预先设置的 *U*/*I* 曲线实现系统内能量平衡，因此系统运行电压可以在 1 个较大的范围内变化，该电压变化范围称为电压带(voltage band)。被动配电系统即依靠电压源(例如外部电网或电池)实现能量平衡的直流配电网，其控制策略一般为主从控制方式，正常运行情况下其电压变化范围相对较窄。

可见，直流配电系统与交流配电系统一样，也存在电压偏差问题。其电压偏差不仅受电源电压变化及配电线路引起的压降的影响，同时不同的电压控制方式也是引起电压偏差变化范围差异的主要原因之一。

2.1.2 直流电气设备对电压带的适应性分析

直流配电系统的最大特点在于其电能利用经过了电力电子装置的转换。基于电力电子装置的控制特点，在直流电压较宽的变化范围内，例如太阳能电池板的输出电压在 1 个较宽的范围变化[19-20]，要求电力电子装置可以输出相对稳定的电压供负载可靠运行。

目前广泛应用的基于脉冲宽度调制 PWM(pulse width modulation)控制的电力电子变换器采用脉宽调制技术控制输出电压的稳定，以适应宽泛的输入电压变化，在此不再赘述；本节以目前广受关注的谐振型 LLC 变换器为例介绍其对电压带的适应性。

谐振型 LLC 变换器之所以能够适应宽泛输入电压变化而输出稳定的供/用电电压，其核心是由

其谐振 LLC 电路的电压增益决定的。其输出、输入等效电路如图 4 所示[19]，图中 L_r、L_m、C_r 构成谐振电路，在前端电路方波电压输出的激励下，文献[21]给出了对应电压增益表达式，即

$$K(Q,g,F_x)=\left|\frac{V_{o,ac}}{V_{in,ac}}\right|=\frac{F_x^2(g-1)}{\sqrt{(gF_x^2-1)^2+F_x^2(F_x^2-1)^2(g-1)^2Q^2}} \tag{1}$$

式中：K 为输出电压 $V_{o,ac}$ 与输入电压 $V_{in,ac}$ 的增益；Q 为品质因数，由 L_r、C_r 及等效负载 R_{ac} 决定；g 由 L_r、L_m 决定；F_x 为基于谐振频率 f_r 的归一化开关频率，$F_x=f_s/f_r$，f_s 为实际开关频率。

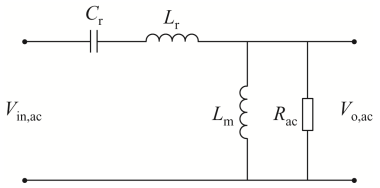


图 4　LLC 谐振电路电压增益的等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of voltage gain of LLC resonant circuit

分析式(1)可知，在输入电压较宽的变化范围内，调整开关频率 f_s 在谐振频率 f_r 附近变化，可保证 LLC 电路均可得到相对稳定的输出电压供负载用电。

综上，直流配电系统的运行电压偏差表现为 1 个变化的电压带，电力电子变换器对该电压带具有较强的适应能力，在一定的电压带范围内，电气设备运行性能不受影响；但是，当电压带的变化范围超出一定的幅度时，电力电子变换器控制输出电压的能力下降，电气设备运行性能降低。因此，直流配电系统的电压偏差问题属于其电能质量的重要议题之一。

2.2 纹波

交流系统的谐波是指工频整数倍的频率分量。在直流系统中其工频等于 0，因此，不存在传统意义的谐波问题。但是，与理想的直流电压相比，由于直流配电系统中广泛存在电力电子装置，例如基于二极管的整流电路或基于晶闸管的整流电路等，其实际运行的直流电压、电流均存在脉动现象，该现象称为纹波现象。图 5 所示为三相全波整流电路输出直流电压的纹波现象。同样基于各类全控器件的整流电路输出直流电压也存在与开关频率相关的纹波。除此之外，目前的智能配电系统也采用公共配电线路传输信号，称为信号电压(mains signaling voltage)[16]，这些信号电压叠加在直流电压之上也会引起直流电压的脉动。IEC TR 63282 指出，纹波是一系列相对于以平均值量化的直流测量电压的周期性变化量。直流配电系统中纹波频率及其幅值特征主要由不同的电力电子变换器特性确定，本文不再赘述。

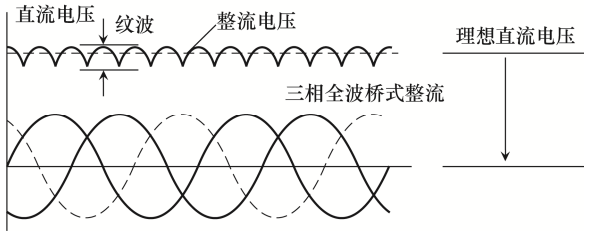


图 5　三相全波整流电路直流纹波现象

Fig. 5 Phenomenon of ripples superimposed on DC voltage delivered by three-phase full-wave rectifier circuit

纹波在直流配电系统中传播不仅引起额外网络损耗、危害设备运行[22]、导致系统闭锁[23]、对通信系统有较大的影响，同时对人体的电击效应也有较大的影响。文献[12]指出，相同电压等级及纹波含量的直流电所携带的纹波频率越高，对人体的危害越大；若直流电的峰值与交流电的峰峰值相同，则其引发心室纤维性颤动的可能性大致相当。考虑到直流纹波现象，需要采用直流电的峰值评估其对人体的影响。可见纹波是评价直流配电系统电能质量的重要技术指标之一。

2.3 不平衡

如果将单极供电视为双极供电的特例，直流配电系统也存在不平衡问题。双极供电系统中，由于两极负荷分配的不平衡或因为负荷时变的分散性，将导致两极电压偏离额定电压的水平各异而引起不平衡现象。同时，双极 IT 系统中单点接地将导致健全极电压升高并引起双极电压不平衡。严重的不平衡问题将危及系统及电气设备的安全运行，例如：地电位升高、中性线过流、极电压升高等。因

此，不平衡问题也是直流配电系统重要的电能质量现象。

2.4 闪变

众所周知，直流配电系统的照明主要是 LED 灯，文献[24]从 LED 的发光原理及其不同电路结构分析了 LED 的灯光照度变化现象。既然 LED 运行过程中存在照度变化就一定存在闪变问题，而闪变现象不仅对人体健康有着重大影响，包括诱发偏头痛、其他精神性疾病、生活不适等[25]，同时良好的闪变控制有利于改善电压变化特征[26]。因此，闪变现象也是直流配电系统的重要电能质量现象之一。

2.5 电压暂降/暂升/短时中断

明显地，IT 系统两点接地故障、TN 系统单点接地故障、正负极间短路故障均导致直流配电系统产生动态电压变化即电压暂降/暂升/短时中断现象[27]。除此之外，直流配电系统动态电压变化分析应特别关注直流配电系统中电力电子变换器接口电容放电对动态电压变化的影响。

任何接地故障发生情况下，尽管电力电子装置出于自身保护会限制短路电流，但是相邻换流器附带的出口电容器却会放电并产生强大的放电电流流向接地点，该放电电流可能迅速引发系统电压骤降，产生电压暂降现象[28]。另外，当直流负载接入直流配电系统时，即使此时直流负载并未运行，直流配电系统将必然地向直流负载变换器接口电容充电(如图 6 所示)[29]。强大的充电电流可能引起接触器触点熔化，甚至产生电压暂降现象。

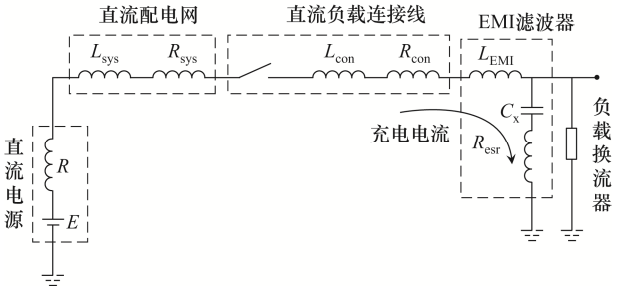


图 6 EMI 滤波电容器充电冲击电流示意

Fig. 6 Schematic of EMI filter capacitor with inrush current during charging

可见，区别于传统的短路故障，直流配电系统应充分关注各类换流器配置的电容器在各类运行工况下快速充放电所导致的动态电压变化。

2.6 其他与电能质量相关的问题

由于直流配电系统存在交变周期性纹波现象，因此，传统交流系统中相关谐波的功率理论仍适用于纹波。

文献[30]第一章详细分析了畸变波形下的功率理论，考虑到直流配电系统的直流及纹波，因此直流配电系统有功功率包括直流有功(P_{DC})、纹波有功(P_{AC})；无功功率包括纹波无功(Q_{AC})，同时还存在畸变无功分量(D_{AC})。据此，直流配电系统也存在功率因数的概念，其定义与交流系统类似，在此不再赘述。

3 交/直流配电系统电能质量统一表征

直流配电系统与交流配电系统电能质量对比见表 1。可见，就电能质量现象而言，若视直流是交流的特例(频率为 0)，则交流配电系统的电能质量现象包含了全部的直流配电系统电能质量现象。本节结合信息技术产业委员会 ITIC(Information Technology Industry Council)曲线[31]分析交直流配电系统电能质量统一表征方法。

表 1 交直流配电系统电能质量现象对比

Tab. 1 Comparison of power quality phenomenon between AC and DC distribution systems

序号	交流系统	直流系统
1	电压偏差	电压偏差
2	频率偏差	无
3	谐波(间谐波)	纹波
4	不平衡	不平衡
5	闪变	闪变
6	电压暂降	电压暂降
7	电压暂升	电压暂升
8	电压短时中断	电压短时中断
9	振荡	—
10	缺口	—
11	尖峰	—

ITIC 曲线根据系统供电电压变化，定义了 7 类

电能质量现象，即电压稳态容限、电压暂升、暂降、短时中断、低频衰减振荡、暂态过电压和瞬态过电压，将 *V*-*t*(电压–时间)平面分为 3 大部分，即：无害区、功能丧失区、损坏区，如图 7 所示。

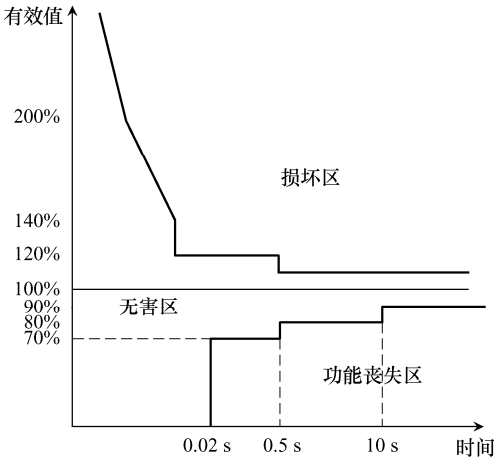


图 7　ITIC 曲线

Fig. 7 ITIC curve

对于直流配电系统，以低压直流配电系统为例，根据运行电压变化及其对系统及设备安全运行的影响，IEC TR 63282 采用类似 ITIC 曲线的思路将 LVDC 电压变化范围(各种可能的运行状态，包括稳态运行及事故状态)0~U_{max} 划分为 7 个电压带(B1~B7)，边界电压用 U1~U6 表示，与之对应的 4 个运行状态 S1~S4、7 个运行区域(电压–时间面积)见图 8。图中：B1 代表跳闸停电电压带；B2 代表极限运行低电压带，系统因严重过负荷而导致供电电压降低，尽管设备仍能运行，但其性能将无法保证，应该采取措施恢复系统电压(例如减载等)；B3 代表额定运行电压带；B4 代表极限运行高电压带，仅允许有限时间段的运行，在该电压带浪涌保护设备可能并不动作；B5 代表过电压带，仅允许有限时间段运行，过电压保护动作；B6 代表过电压故障发生电压带，在该电压带电气设备将因该过电压而导致损坏；B7 代表禁止运行电压带。

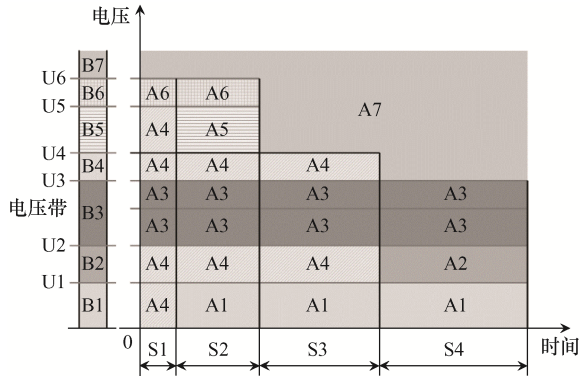


图 8　LVDC 电压带及其对应的系统运行状态和运行区域

Fig. 8 LVDC voltage band with corresponding operation states and areas of system

图 8 中 S1~S4 从时间轴线进行划分，其中 S1~S3 为瞬态及暂态，S4 为稳态。从电压–时间二维角度划分了 7 个区域，其中 A1 为停运区，A2 为极限运行区，A3 为额定运行区，A4 为异常运行区，A5 为过电压 1 区，A6 为过电压 2 区，A7 为禁止运行区。

对比图 7 和图 8 可见，从电压幅值及其持续时间的特征量出发，ITIC 曲线将交直流电能质量现象完美地统一起来，便于从电能质量角度理解交直流配电网电压的变化及其对电气设备的影响。

4　直流配电系统电能质量指标及应用

目前国际范围内还没有直流配电系统电能质量现象的描述指标。本章基于前述直流配电系统电能质量现象的分析，探究描述直流配电系统电能质量现象的系列指标，便于从实践中量化各类电能质量现象的严重程度。

4.1　直流配电系统电能质量指标

4.1.1　电压偏差

考虑到传统电压偏差的定义，即运行电压相对于额定电压的偏离程度，直流配电系统的电压偏差可表示为

$$\Delta U_{\%}=\frac{U_{\mathrm{D}}-U_{\mathrm{DN}}}{U_{\mathrm{DN}}}\cdot 100\% \tag{2}$$

式中：U_{DN} 为直流标称电压；U_{D} 为实际运行的直流电压(正极或负极)；$\Delta U_{\%}$ 为电压偏差(相对值)。

4.1.2　纹波

对于纹波的衡量，IEC 61000-4-7[32]指出，纹波大小可用直流脉动的峰谷差进行衡量，如图 9 所示。图中：U_{max} 为最大峰值；U_{min} 为最小谷值。IEV

161-02-25 指出，纹波是脉动信号减去其直流量所剩余的部分，因此可用纹波频率及其幅值量化纹波。IEC TR 63282 指出，纹波可以采用瞬时值或有效值评估。综上所述，可采用纹波系数或纹波率定量描述实际运行的直流配电系统纹波，分别表示为

$$\alpha = \frac{U_{\mathrm{PP}}}{U_{\mathrm{av}}} \cdot 100\% \tag{3}$$

式中：α 为纹波系数；U_{PP} 为谷峰电压差；U_{av} 为平均电压。

$$\gamma = \frac{U_{\mathrm{rms}}}{U_{\mathrm{av}}} \cdot 100\% \tag{4}$$

式中：γ 为纹波率；U_{rms} 为纹波方均根值。

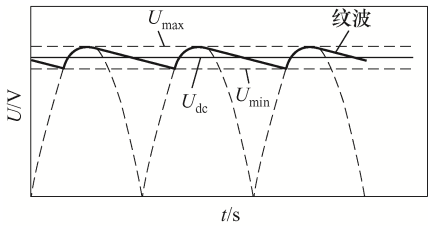


图 9 IEC 61000-4-17 推荐的纹波衡量示意

Fig. 9 Schematic of ripple measurement recommended by IEC 61000-4-17

4.1.3 不平衡度

在交流系统中，三相不平衡度采用对称分量法分析，用负序或零序分量与正序分量的比值表征不平衡度。

在双极直流系统中，可采用共模电压及差模电压的概念解耦正负极电压并描述其不平衡程度。设正极对中点电压为 U_{p}，负极对中点电压为 U_{n}，由此得到差模电压为 $U_{\mathrm{l}} = \dfrac{U_{\mathrm{p}} - U_{\mathrm{n}}}{2}$，共模电压为 $U_0 = \dfrac{U_{\mathrm{p}} + U_{\mathrm{n}}}{2}$，则 U_{l}、U_0 将双极电压 U_{p}、U_{n} 解耦为相互独立的 2 个电压。

为便于描述双极直流系统的电压不平衡程度，定义 U_{l} 为平衡电压，U_0 为不平衡电压，并定义其不平衡度为

$$\varepsilon = \frac{2U_0}{U_{\mathrm{DN}}} \cdot 100\% \tag{5}$$

4.1.4 闪变

闪变的实质在于衡量电压的波动水平。IEC 61000-4-15[33]提供了基于平方解调的交流供电系统的闪变测量方法，若视直流是交流的特例(频率为 0)，该测量方法仍然可用于直流配电系统的闪变监测。

对于交流波动信号，有

$$u(t) = A[1 + m \cdot \cos(\Omega t)]\cos(\omega t) \tag{7}$$

式中：A 为工频载波电压的幅值；m 为调幅波电压峰值与工频额定电压峰值之比；ω 为载波工频角频率；Ω 为调制波角频率。该信号平方解调后包含的各频率分量如表 2 第 2 列所示，包含波动频率 Ω 对应的信号为 mA^2。

表 2 交直流信号平方后的频谱分量

Tab. 2 Spectrum component after squaring of AC and DC signals

角频率	交流系统	直流系统
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	$A^2(1+m^2/2)/2$	—
$2(\omega+\Omega)$	$m^2A^2/8$	—
$2(\omega-\Omega)$	$m^2A^2/8$	—
$2\omega+\Omega$	$m^2A^2/2$	—
$2\omega-\Omega$	$m^2A^2/2$	—

对于直流载波波动信号，视式(7)中的 ω=0，则平方解调后包含的各频率分量如表 2 第 3 列所示，同样包含调制波频率 Ω 对应的信号，即

$$u(t) = A[1 + m \cdot \cos(\Omega t)] \tag{8}$$

可见，通过平方解调均可得到波动频谱 Ω 对应的波动量，再依据 IEC 61000-4-15 要求的后续方法进行闪变计算。

4.1.5 电压暂降/暂升/短时中断

电压暂降、暂升、短时中断现象与交流配电系统完全相同，仍可采用 IEC 61000-4-30[34]定义的维持电压和持续时间 2 个指标描述。其中维持电压可取有效值或平均值。

4.2 直流配电系统电能质量指标应用算例

类似 GB/T 19862[35]电能质量检测设备精度测量要求，对直流信号叠加各类影响量包括不平衡

度、纹波、闪变等，采用本文提出的指标量化直流配电系统电能质量现象。

设直流信号如图 10 所示，图中：正、负极额定电压为 U_{DN}=100 V；不平衡状态下正极运行电压为 1.52U_{DN}，负极运行电压为 1.4U_{DN}(理论计算不平衡度为 12%)；采用方波对正负极运行电压进行调制以模拟电压波动，波动幅度为 2.888%，波动频率为 0.916 7 Hz，GB/T 19862 给出的理论计算闪变值为 4；叠加纹波包括 10%U_{DN}@350 Hz、5%U_{DN}@650 Hz、5%U_{DN}@1 250 Hz、1%U_{DN}@ 375 Hz。

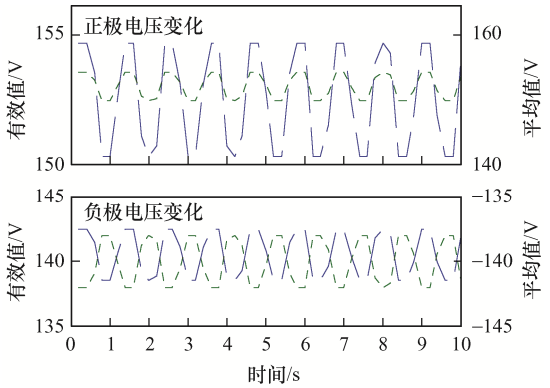


图 10　正负极电压变化

Fig. 10 Changes in positive and negative polar voltage

采用 620 s 时间段的信号进行采样分析(短时闪变需要 10 min 信号采样)，除闪变外其他指标电能质量分析时间窗固定为 200 ms。第 1 组结果数据见表 3。计算结果与理论设置值对比可见：本文提出的直流电能质量指标较好地量化了直流配电系统电能质量现象。

表 3　第 1 组计算结果

Tab. 3 Calculation results of first group

指标	正极	负极
有效值/V	154.683 7	142.552 2
平均值/V	154.194 9	−142.021 6
纹波系数/%	0.029 7	0.031 3
纹波率/%	7.969 3	8.652 3
350 Hz 纹波/%	10.000 0	10.000 0
650 Hz 纹波/%	5.000 0	5.000 0
1 250 Hz 纹波/%	5.000 0	5.000 0
375 Hz 纹波/%	1.000 0	1.000 0
平衡电压/V	148.108 2	
不平衡电压/V	6.086 6	
不平衡度/%	12.173 3	
闪变	4.010 3	4.032 8

5　直流配电系统电能质量问题研究展望

随着直流配电系统的建设运行，直流配电系统电能质量问题将会引起更加广泛的重视，下述议题急需关注。

5.1　直流配电系统电能质量标准化研究

只有定义了直流配电系统各类电能质量现象的衡量指标才有可能在统一口径下进一步量化直流配电系统的电能质量干扰，并进一步分析其危害，提出解决问题的措施。因此，标准化地定义直流配电系统电能质量现象的各类衡量指标是深入开展直流配电系统电能质量问题研究的前提。传统的直流电压、电流一般以平均值进行衡量，因此基于平均值概念的直流配电系统电能质量指标定义值得关注。

众所周知，各类电能质量干扰是 1 种时变信号，不同的测量时间周期得到的记录结果不同，不同的记录简约方法得到的结果也不相同，因此，基于技术经济因素的直流配电系统电能质量测量方法研究是问题的另一个研究方向及热点。

实际上，正如前文指出的，直流配电系统是交流系统的特例，因此基于 IEC 61000-4-30 规定的交流系统各类电能质量指标的测量方法是开展直流配电系统电能质量测量方法研究的基础。尽管 IEC 61000-4-30 有工频周期的概念，但若用固定的 20 ms 置换该工频周期将方便地实现交直流电能质量监测方法的统一。

基于交流系统电能质量干扰的正态分布假设，直流配电系统电能质量干扰可视为正态分布，因此应用于交流配电系统电能质量评估的 95%概率大值概念仍可推广用于评估直流配电系统的电能质量水平。

考虑到直流配电网中存在不同类型的变换器

及其控制模式，基于直流电网多变换器特征及其控制方式的电能质量分析也值得引起重视。

5.2 直流配电系统电能质量危害影响及其控制研究

电能质量问题之所以引起关注是因为其干扰存在的危害影响。由于大量电力电子设备在直流配电系统的应用，其敏感的抗扰度特性使得研究直流配电系统电能质量影响危害比交流系统更加迫切。特别地，直流配电系统是 1 个基于各类控制策略的数字化电力系统，电能质量干扰对控制系统的影响将导致不可预见的运行状态出现，也值得进一步关注。

基于直流电能质量干扰的危害，直流配电系统电能质量也需要维持在一个可控的水平，因此，如何结合直流配电系统中大量应用的电力电子设备实现直流配电系统电能质量水平的控制，是直流配电系统电能质量控制研究的发展方向。

6 结语

本文分析并总结了当前直流配电系统中主要存在的电能质量问题。与交流供电系统类似，直流配电系统也广泛存在各类电能质量问题，包括电压偏差、纹波、不平衡、闪变、电压暂降(短时中断)、电压暂升等。直流配电系统实际运行中，需要关注接地方式及其对电能质量问题的影响；同时，了解不同控制运行方式下电压的变化规律及电压带的分布对直流电能质量问题的分析具有重要意义。此外，考虑到纹波现象，直流配电系统也存在由纹波功率导致的无功及功率因数问题。本文提出了量化直流配电系统电能质量现象的主要技术指标，并进行了算例仿真计算。算例结果表明所提出的系列指标能够定量描述直流配电系统的电能质量现象。未来应着重关注直流电能质量相关标准的制定与评估体系的建立，并在考虑交直流系统、多电压等级电能质量相互影响的基础上，研究适用于直流配电系统的电能质量治理方案。

参考文献：

[1] Salonen P, Kaipia T, Nuutinen P, et al. An LVDC distribution system concept [C]// Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE). Espoo, Finland, 2008.

[2] International Electrotechnical Commission. LVDC: Electricity for the 21st century [R]. Switzerland: IEC, 2017.

[3] 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. (in Chinese)

[4] 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, 2016: 1-6.

[5] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 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.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Guideline for standard voltages of medium and low voltage DC distribution system: GB/T 35727—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)

[6] IEEE recommended practice for 1 kV to 35 kV medium-voltage DC power systems on ships: IEEE 1709-2018 [S]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018.

[7] IEC electrical installations of buildings: IEC Standard 60364 [S]. Switzerland: IEC, 2018.

[8] IEC standard voltages: IEC 60038 Ed. 7.1 b: 2021 [S]. Switzerland: IEC, 2021.

[9] LVDC systems - Assessment of standard voltages and power quality requirements: IEC/TR 63282 [S]. Switzerland: IEC, 2020.

[10] European Commission. Low voltage directive (LVD): 2006/95/EC [S]. Brussels: European Union Directive, 2006.

[11] 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, 13.
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, 13. (in Chinese)

[12] IEEE recommended practice for monitoring electric power quality: IEEE 1159-2019 [S]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019.

[13] 李露露. 民用低压直流系统接地型式与短路保护研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
Li Lulu. The research on grounding type and short circuit protection of civil low voltage direct current system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)

[14] Salonen P, Kaipia T, Nuutinen P, et al. Fault analysis of LVDC distribution system [C]// WESC 2008, 2008.

[15] Low voltage electrical installations and safety at electrical work: SFS 6000 [S]. National Low Voltage Standard-Series. SESKO Standardization in Finland, 2000.

[16] Assessment of power quality - Characteristics of electricity supplied by public networks: IEC/TS 62749 Ed. 2.0 en: 2020 [S]. Switzerland: IEC, 2020.

[17] 符杨, 王晓旭, 米阳, 等. 基于本地自适应调节的交直流混合微电网全局协调控制[J]. 电测与仪表, 2022, 59(7): 152-162.
Fu Yang, Wang Xiaoxu, Mi Yang, et al. Global coordination control for AC/DC hybrid micro-grid based on local adaptive regulation [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(7): 152-162. (in Chinese)

[18] 陈督好, 陈众. 功率自适应分配的孤岛直流微网控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 20-26, 45.
Chen Duhao, Chen Zhong. Research on control strategy with power adaptive allocation for isolated DC micro-grid [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 20-26, 45. (in Chinese)

[19] Edwin F, Xiao Weidong, Khadkikar V. Topology review of single phase grid-connected module integrated converters for PV applications [C]// IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, QC, Canada, 2012: 821-827.

[20] Chen S M, Liang T J, Yang L S, et al. A safety enhanced, high step-up DC-DC converter for AC photovoltaic module application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4): 1809-1817.

[21] Cao Qi, Li Zhiqing, Wang Haoyu. Wide voltage gain range LLC DC/DC topologies: State-of-the-art [C]// 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia). Niigata, Japan, 2018: 100-107.

[22] 陈和洋, 郑文迪, 吴文宣. 采用直流分量恢复法的直流系统谐波分析[J]. 电测与仪表, 2021, 58(1): 96-103.
Chen Heyang, Zheng Wendi, Wu Wenxuan. Harmonic analysis of DC system using DC component recovery method [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(1): 96-103. (in Chinese)

[23] 常鹏飞, 刘天琪, 陈相, 等. 交直流系统互补谐振谐波不稳定的抑制措施[J]. 电测与仪表, 2020, 57(8): 108-114.
Chang Pengfei, Liu Tianqi, Chen Xiang, et al. Suppression measures of harmonic instability for complementary resonance in AC/DC system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(8): 108-114. (in Chinese)

[24] LVDC systems - Assessment of standard voltages and power quality requirements: IEC/TR 63282 [S]. Switzerland: IEC, 2020.

[25] IEEE recommended practices for modulating current in high-brightness LEDs for mitigating health risks to viewers: IEEE 1789-2015 [S]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015.

[26] Math B, Shay B, Amin K, et al. Volt-var control and power quality (Cigre/Cired C4.24) [C]// 23rd International Conference on Electricity Distribution. Lyon, France, 2015: 0183.

[27] 薛士敏, 金毅, 陈超超, 等，低压直流配电系统故障分析和仿真研究[C]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第 29 届学术年会. 宜昌，中国, 2013.
Xue Shimin, Jin Yi, Chen Chaochao, et al. The fault analysis and simulation study of the low voltage direct current distribution system [C]// The 29th China Universities Annual Conference on Electric Power System and Automation. Yichang, China, 2013. (in Chinese)

[28] 刘虎, 李俊刚, 冀娟, 等. 直流配电系统故障研究[J]. 数字技术与应用, 2018, 36(12): 77-78, 80.
Liu Hu, Li Jungang, Ji Juan, et al. A research of the fault

in DC distribution system [J]. Digital Technology & Application, 2018, 36(12): 77-78, 80. (in Chinese)

[29] Whaite S, Grainger B, Kwasinski A. Power quality in DC power distribution systems and microgrids [J]. Energies, 2015, 8(5): 4378-4399.

[30] 李世林, 左强. 无功补偿装置标准应用手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Li Shilin, Zuo Qiang. Standard Application Manual of Reactive Power Compensation Device [M]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)

[31] Thallam R S, Heydt G T. Power acceptability and voltage sag indices in the three phase sense [C]// 2000 Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle, WA, USA, 2000: 905-910.

[32] Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto: IEC 61000-4-7: 2002 [S]. Switzerland: IEC, 2002.

[33] Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-15: Testing and measurement techniques: Flickermeter-functional and design specification: IEC61000-4-15 [S]. Switzerland: IEC, 2003.

[34] Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods: IEC 61000-4-30 [S]. Switzerland: IEC, 2021.

[35] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量检测设备通用要求: GB/19862—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
National Technical Committee on Voltages, Current Ratings and Frequencies of Standardization Administration of China. General requirement for monitoring equipment of power quality: GB/19862—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)



周文

作者简介：

周文(1978—)，男，中国电源学会会员，硕士，教授级高级工程师。研究方向：电能质量分析与治理。E-mail：hbdyyzhw@163.com。

苏灿(1994—)，女，硕士，工程师。研究方向：电能质量分析与治理，新能源技术。E-mail：sucan51372@163.com。

胡雪凯(1987—)，男，中国电源学会会员，硕士，高级工程师。研究方向：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：新能源并网控制技术及电能质量技术。E-mail：dyy_yanp@163.com。

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

刘军成(1966—)，男，中国电源学会高级会员，通信作者，本科，教授级高级工程师。研究方向：电能质量。E-mail：junchengL@263.net。

(责任编辑：郭凯凯)