

DOI: 10.7667/PSPC161200

## 直流配电能质量研究综述

姚钢<sup>1</sup>, 纪飞鹏<sup>1</sup>, 殷志柱<sup>2</sup>, 周荔丹<sup>3</sup>, 王丰华<sup>3</sup>

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海电气集团股份有限公司中央研究院, 上海 200070;  
3. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

**摘要:** 直流配电能质量研究直接影响到当前直流配电理论技术的发展。首先论述了直流配电系统的配电电压等级和网络结构, 然后详细分析了当前直流配电系统中存在的电压波动、闪变和谐波等电能质量问题。接着重点阐述了迄今为止国内外相关的直流配电能质量标准, 以及适用于直流配电能质量的评估体系和方法。之后总结归纳了当前国内外对直流配电系统中电能质量问题的治理方案。最后对目前直流配电能质量的研究方向进行了探讨, 为今后直流配电能质量的研究提供参考。

**关键词:** 直流配电; 电压波动; 直流标准; 谐波; 评价方法

### Review on the research of DC power distribution power quality

YAO Gang<sup>1</sup>, JI Feipeng<sup>1</sup>, YIN Zhizhu<sup>2</sup>, ZHOU Lidan<sup>3</sup>, WANG Fenghua<sup>3</sup>

(1. College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;  
2. Central Academe, Shanghai Electric Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China; 3. Department of  
Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The research of the power quality of DC power distribution system directly affects the development of the theory and technology of DC power distribution. This paper firstly discusses the distribution voltage level and network structure of DC power distribution system, and then analyzes the voltage fluctuation, flicker, harmonics and other power quality problems in the current DC power distribution system. Then, it focuses on the current domestic and foreign direct current distribution power quality standards, as well as the evaluation system and method applicable to power quality of DC distribution system. After then, it summarizes the current domestic and foreign power quality control solutions for DC distribution system. At last, the research directions of DC power distribution power quality are discussed, which provides reference for the study of DC power distribution power quality in the future.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61374155) and Special Fund for Doctoral Research in Universities and Colleges (No. 20130073110030).

**Key words:** DC distribution; voltage deviation; DC standard; harmonic; evaluation method

## 0 引言

近几年, 随着半导体技术和分布式能源发电的快速发展, 直流供电逐渐显现出技术、经济和环保的优势, 直流配电技术受到国内外广泛关注。相比于交流配电网, 直流配电能质量没有频率和相位问题<sup>[1]</sup>, 电能质量较高。但是当前直流配电系统中依然存在着关键性的电能质量问题, 影响直流配电理论技术的发展; 而且, 目前直流配电系统尚无明确、具体的电能质量评价体系和指标, 缺乏科学、

完善的评估方法, 无法准确全面地评估直流配电网的电能质量, 影响直流配电的分质定价上网。

考虑到直流配电能质量研究对直流供电理论技术的发展和实际工程的推广意义重大, 本文针对当前直流配电能质量研究进行综述, 探索直流配电能质量存在的问题、评估方法和标准、问题的治理方案, 为直流配电系统电能质量的研究提供参考。

## 1 直流配电系统

### 1.1 直流配电的电压等级

完善的系统结构和合理的电压等级是保证直流配电系统稳定、高电能质量的首要条件。同等对

基金项目: 国家自然科学基金项目(61374155); 高校博士点  
专项科研基金(20130073110030)

应电压等级下, 直流比交流的配电容量大<sup>[2]</sup>, 制定合理的电压等级能够很好地应对未来直流负荷的发展需求和配电网的结构变化。文献[2]提出了直流配电网的一组电压序列等级, 从高压到超低压相互配合, 如图 1, 为直流配电电压等级的制定提供了参考。

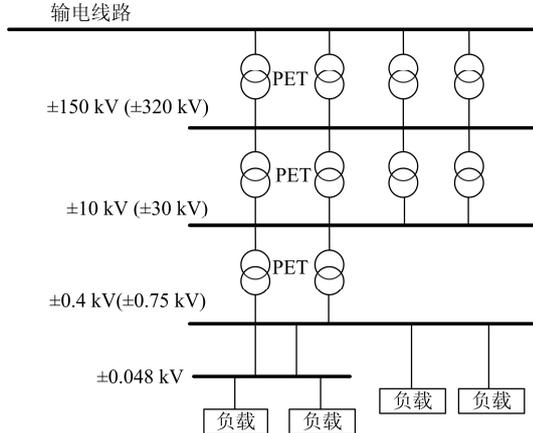


图 1 直流配电系统电压等级

Fig. 1 DC power distribution system voltage level

家庭直流配电网是未来直流配电网发展的一个重要趋势, 文献[3]将未来家庭直流配电电压分为高压(380 V)和低压(48 V)两个等级, 其中低压用于供应家庭笔记本、照明灯等家庭常用电器。文献[4]对直流配电网适用的 4 个电压等级(326 V、230 V、120 V 和 48 V)进行比较, 最后从科技和经济角度考虑确定直流配电线路最合适的电压等级为 326 V。

### 1.2 直流配电网结构

直流配电网的网络结构涉及供电可靠性、电能质量等关键问题, 完善的网络结构能够保证系统稳定, 满足未来城市直流配电的发展需求, 而且较为成熟的柔性直流输电技术<sup>[5]</sup>也为完善直流配电网网络结构提供了借鉴。文献[6-8]综合介绍了近年来国内外研究机构对直流配电网的网络结构以及直流配电的关键技术研究。当前有关直流配电研究的仿真模型和已建成的实际工程的拓扑结构较多。基本拓扑结构主要有环状、放射状与两端配电 3 种<sup>[7]</sup>。

文献[9]提出一种双极型直流微电网结构, 如图 2, 通过变压器和整流器, 从 6.6 kV 交流配电网获得 340 V 直流电压, 配电网采用 3 条主供电线路结构, +170 V、中性线和 -170 V。蓄电池和超级电容等储能设备通过 DC-DC 转换器连接到直流母线, 燃气轮机和光伏电池等分布式电源, 分别通过 DC-DC 转换器和 AC-DC 转换器连接到直流母线。配电网能够基于直流母线供应多种电力, 如 AC 100 V、DC 48 V、DC 340 V 等, 满足用户的不同需求。

文献[10-13]提出符合现代建筑特点和需求的城市建筑直流供电系统结构。文献[14]是厦门大学建立的校园直流微电网, 系统结构如图 3, 采用低压直流配电母线的构成方式, 使用 150 kW 屋顶太阳能发电, 模拟城市社区和办公用电, 探索现代城市直流配电模式。

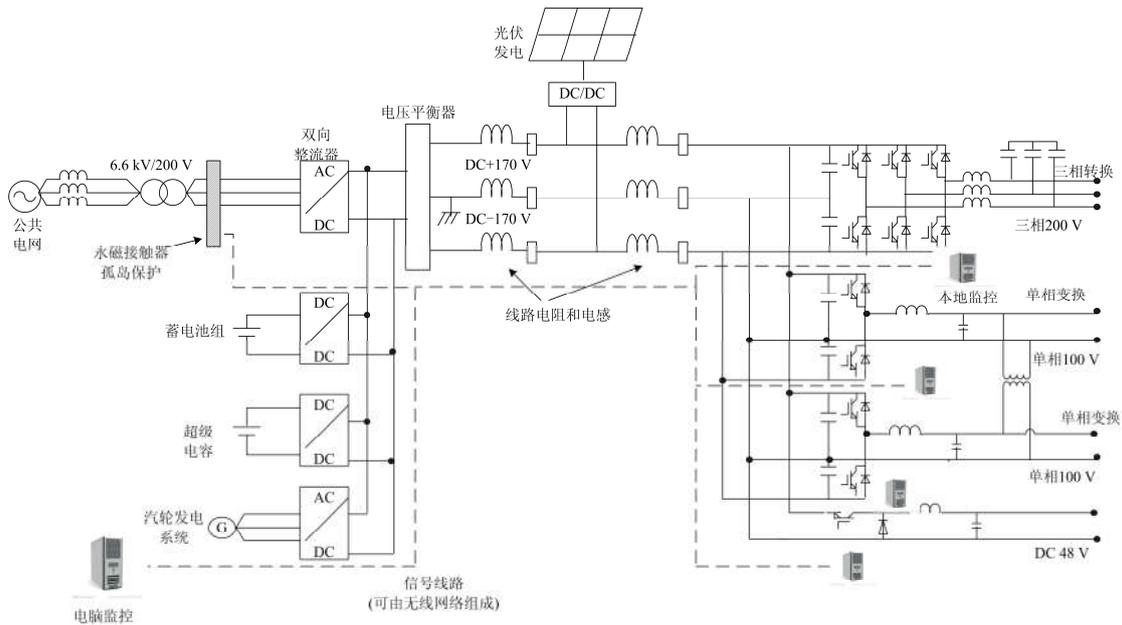


图 2 直流微电网双极结构

Fig. 2 DC micro grid bipolar structure

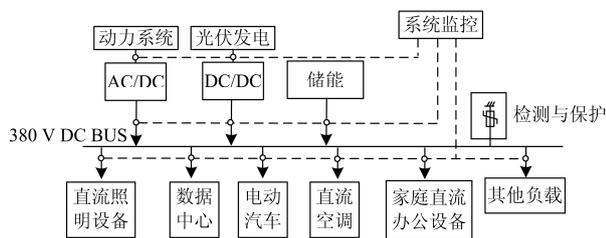


图3 厦门大学直流微电网系统结构

Fig. 3 DC micro-grid systems structure of Xiamen University

## 2 直流配电能质量问题

### 2.1 电压波动和闪变问题

电压波动和闪变问题是直流配电系统中常见的电能质量问题,影响负荷用电,危害系统的安全运行,如导致LED灯闪烁引起人体不适,影响计算机、工业控制设备等直流用电设备的正常工作。在直流系统中,导致电压波动和闪变问题的原因较多。

文献[15]探讨了当前直流配电存在的电能质量问题,其中光伏、风电等微源的功率输出波动和负荷是引起直流馈线电压波动的主要原因。风力发电由于风的本身特性,造成风电机输出功率波动,其对直流配电系统主要的负面影响就是容易引起配电网电压波动<sup>[16]</sup>。对于光伏发电,输出功率受太阳辐射强度变化的影响大,当天气突然变化时,输出电压不稳,易引起直流配电网电压波动<sup>[17]</sup>。此外,直流微电网中常见的分布式电源投切会导致配电网电压闪变。

在直流配电系统中,负载的运行也会引起系统电压问题,如直流电弧炉等大功率负载,运行时会引起电网电压波动;变频空调,电动机启动瞬间的高电流和低功率因素会导致电网电压闪变;直流配电系统中大量使用的电力电子设备会产生谐波和间谐波,引起灯光闪变。文献[18]在实验室中专门设计并建立闪变仪的分解模型,测得不同频率的间谐波对荧光灯的闪变效应。

文献[19]介绍了直流微电网中负载的种类分布,约75%~80%是恒功率负载,20%~25%为阻性负载。恒功率负载存在负阻抗特性,因此直流电压偏离理想参考点有可能导致直流电压出现波动,甚至可能导致整个系统崩溃<sup>[20]</sup>。

### 2.2 电压偏差和电压跌落问题

电压偏差和电压跌落是直流配电系统中另一常见的电压问题。电压偏差会影响日常家用电器冰箱、变频空调使用,当电压出现越限时,可能导致电器损坏;电压跌落会对工业中敏感负荷、企业数据中心以及直流配电系统中广泛应用的电力电子设

备造成影响。

在当前直流配电系统中,负荷及各微源出力、运行方式与网络结构等因素发生变化都会引起直流微网功率的不平衡,而有功不平衡则是引起直流微网电压偏差的根本原因<sup>[15]</sup>。

由于分布式电源的输出功率不稳,易导致直流母线电压跌落,文献[21]通过仿真分析了光伏电站低电压穿越的故障特性,并且分析了低电压穿越对直流配电系统继电保护的影响。当前,直流配电系统控制算法不完善,为实现在不同变换器间合理分配负荷功率,多数研究将下垂控制引入到直流系统的控制算法中,但是在其实现负荷功率分配的同时,会带来母线电压的跌落<sup>[22]</sup>。

直流配电系统出现支路故障时,会引起直流母线的电压偏差和电压跌落。文献[23]详细分析了直流微电网中出现的极间故障和接地故障,不同故障对网络电压电流的影响严重程度不同,其中正极低阻接地会导致明显的电压偏移,极间故障时,配电线路瞬间出现激增电流,电压严重跌落。

### 2.3 谐波问题

直流配电系统电能质量较高,相对传统交流配电网,配电网中谐波源少,其谐波主要来源于系统中的负载。直流配电系统中常见的脉冲负载,如混合动力汽车以及大负载启动时,会产生谐波并注入到配电网中。特别是当前电动汽车已经产业化,电动汽车的充放电对直流电网输配电的电压谐波问题有着非常大的影响。文献[24]介绍了电动汽车充电站产生的谐波电流对电网的影响,分析了多台充电机的谐波特征,建立模型并给出计算谐波电流放大倍数的公式。计算出的值为系统电流、电压的准确监测提供了理论基础,公式为

$$I_{i,t} = \frac{I_{i,150} - I_{i,0}}{150}t + I_{i,0}, \quad 0 \leq t \leq 150 \quad (1)$$

$$I_{i,t} = \frac{I_{i,270} - I_{i,150}}{120}(t - 150) + I_{i,150}, \quad 150 \leq t \leq 270 \quad (2)$$

式中,  $I_{i,0}$ 、 $I_{i,150}$  和  $I_{i,270}$  分别对应起始充电时刻谐波电流、第150 min谐波电流和最后1 min谐波电流。

交直流混合电网之间的相互影响也是直流配电网的谐波来源之一,文献[25]对混合微电网在孤立和非孤立两种情况下进行谐波分析,其中交流侧的畸变电流会通过变换器注入到直流母线中,同时交流侧发电机端波形严重畸变。文献[26]对直流配电网电力电子换流器接口产生的谐波进行了分析。目前有关直流配电系统谐波的研究较少,直流配电的谐波分析还有待深入研究。

### 3 直流配电电能质量综合评估

当前国内外对直流配电系统的研究还处于起步阶段,实际工程项目还很少,难以针对直流配电系统制定具体的电能质量标准。但传统交流电能质量的研究已经比较成熟,现有的国家 8 项电能质量标准,多种比较成熟的交流电能质量评估方法。此外部分直流电能质量标准较为成熟,这些为直流电能质量的综合评估和相关标准的制定提供了借鉴。

#### 3.1 直流配电电能质量标准

直流配电电能质量标准的制定是目前直流配电研究亟需解决的一个问题,直接关系到直流配电实际工程的建设和推广。现今,船舶、军舰直流区域配电研究已然深入,文献[27]是美国海军应用的直流电压接口标准,标准包括各电压等级的稳态电压波动标准、最大电压偏移值、电压纹波的标准等,如表 1 所示,本文列出其中部分标准数据,希望为直流配电电压标准的制定提供参考。

表 1 375 V 直流电能质量

Table 1 375 V DC power quality

| 类别               | 数值               |
|------------------|------------------|
| 稳态电压容差(系统要求)     | ±4%              |
| 最大电压纹波振幅         | 1.5% Vrms        |
| 电压纹波频率           | <10 kHz          |
| 最大电压偏移值          | 395 V            |
| 稳定状态电压范围(负载正常运行) | ±5%              |
| 异常服务稳态电压范围       | 0~95%和 105%~110% |
| 电压暂态突变范围(负载正常运行) | ±8.5%            |
| 电压暂态恢复时间         | 250 ms           |
| 最大电压尖峰(正常运行)     | 750 V            |

迄今,国际上对直流系统电压稳定的普遍定义是:能够承受系统电压额定值的±10%内的所有适宜电压<sup>[28-29]</sup>。文献[30]介绍了直流微电网中电压稳定的标准:在系统受干扰时,直流母线电压波动不超过系统额定值的±5%。本文从用户侧和分布式电源接入综合考虑,建议直流配电系统的电压标准:电压波动不超过系统额定电压的±10%。

截止目前,国内外已建成 30 多项柔性直流输电工程并投运。文献[31]对 HVDC 输电系统直流侧的谐波进行了分析和定义,并且列举了现有实际工程项目中的谐波标准,其中伊泰普高压直流输电的各次谐波电流限定标准较为详细,如表 2,本文将其列出,希望为后续直流配电系统谐波标准的制定提供参考。

表 2 伊泰普项目限定允许最大的谐波电流

Table 2 Maximum permissible harmonic current limits

for ITAIPU HVDC project

| 频率/Hz | 最大电流/A | 频率/Hz | 最大电流/A |
|-------|--------|-------|--------|
| 50    | 5.0    | 800   | 0.3    |
| 60    | 5.0    | 840   | 0.3    |
| 100   | 2.0    | 850   | 0.3    |
| 120   | 2.0    | 900   | 0.3    |
| 150   | 1.0    | 950   | 0.3    |
| 180   | 1.0    | 960   | 0.3    |
| 200   | 0.8    | 1000  | 0.3    |
| 240   | 0.8    | 1020  | 0.3    |
| 250   | 0.8    | 1050  | 0.3    |
| 300   | 0.8    | 1080  | 0.3    |
| 360   | 0.5    | 1140  | 0.3    |
| 400   | 0.4    | 1150  | 0.3    |
| 420   | 0.4    | 1200  | 0.3    |
| 480   | 0.3    | 1320  | 0.3    |
| 500   | 0.3    | 1380  | 0.3    |
| 540   | 0.3    | 1440  | 0.3    |
| 550   | 0.3    | 1500  | 0.3    |
| 600   | 0.5    | 1800  | 0.3    |
| 650   | 0.3    | 1800  | 0.3    |
| 660   | 0.3    | 2100  | 0.2    |
| 700   | 0.3    | 2400  | 0.2    |
| 720   | 0.5    | 2520  | 0.2    |
| 750   | 0.3    | 2880  | 0.2    |
| 780   | 0.3    |       |        |

#### 3.2 直流配电电能质量评估方法

针对直流配电系统电能质量的评估,首先需要确定直流电能质量特殊的评估体系。文献[32]基于现有交流电能质量的 7 项国家指标,结合模糊数学法和层次分析法,构造了一个多层模糊评价模型,提出适用于直流电能质量评估的分级指标体系和评价指标,如图 4。

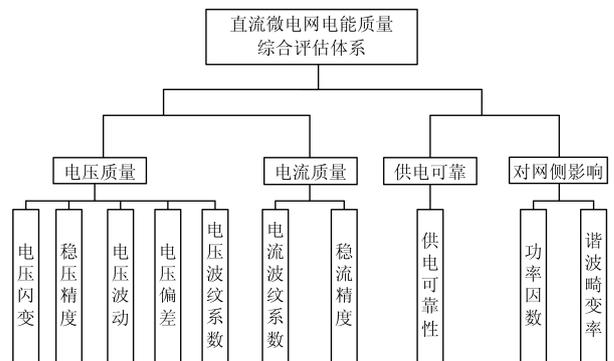


图 4 直流微电网的电能质量评价体系

Fig. 4 Power quality evaluation system of DC micro grid

直流配电系统中含有分布式电源, 影响电能质量评估的因素多, 需要准确、客观地评估电能质量, 并且突出相对重要的电能质量评价指标在评估中的作用。文献[33]引入基于熵权的理想解法, 利用熵值法确定指标的权重, 避免了主观因素对指标权重设置的影响, 再通过理想解法对电能质量进行有效、合理的综合评估。文献[34]提出的突变决策模型, 利用突变思想, 在确定各个电能质量指标的权重时, 减少主观因素的影响。

准确全面地评估电能质量, 能够引导解决直流配电系统中出现的电能质量问题, 帮助分析直流配电系统中的各个组成部分, 对改善直流配电的系统结构, 提高系统的电能质量具有非常重要的意义。

文献[35]构建一套低压直流供电系统综合评估指标体系, 结合熵权系数法和层次分析法, 提出综合赋权法, 避免了评价指标过于客观和过于主观。同时, 采用灰色关联分析法, 准确全面地评估了低压直流配电系统的电能质量。

对规划阶段的电能质量评估是直流配电电能质量评估的重要组成部分, 当前很多实际工程的建设已经被提上议程, 规划阶段的电能质量评估直接关系到直流配电实际工程建设的可靠性、经济性以及科学性。文献[36]提出改进的基于 AHP 的电能质量评估方法, 在配电网规划阶段对含有微电网的配电网电能质量进行评估, 先求出单个微网的电能质量情况( $Z_i$ ), 再求出所有微网对配电网电能质量的综合影响( $Z'$ ), 评估公式为

$$v_j = \sum_{i=1}^n \omega_i^{(1)} \omega_{ij}^{(2)} \quad (3)$$

$$Z_i = \sum_{j=1}^h \frac{v_j C F_{ij} P_{ij}}{P_{sci}} \times 100\% \quad (4)$$

$$Z' = \sum_{i=1}^m Z_i \quad (5)$$

式中:  $\omega_i^{(1)}$  和  $\omega_{ij}^{(2)}$  是由改进的 AHP 法求解得到的, 分别表示不同的相对权重;  $C$ 、 $P_{ij}$  和  $P_{sci}$  分别是分布式电源的容量系数、容量和短路容量;  $F_{ij}$  是概率密度函数;  $v_j$  是计算各类分布式电源对目标层  $Z$  的总权值。

## 4 直流配电电能质量问题治理方案

### 4.1 电压波动和闪变问题的治理

针对储能装置提出合适的控制算法是目前治理直流配电系统电压波动和闪变问题最好、也是最广泛的办法之一。文献[37]提出了基于电压下垂法的直流微电网混合储能控制策略, 下垂控制稳定直

流母线电压的控制框图如图 5(图中  $I_{es}$  表示混合储能系统注入直流母线的电流), 依据直流母线电压( $U_{dc}$ )信息, 利用混合储能补偿, 将直流母线电压控制在小范围波动。文献[38]在依据直流母线电压信息的基础上添加储能装置的储能单元剩余容量(state of charge, SOC)信息, 提出基于 SOC 的直流微电网的电压控制算法, 比传统控制算法仅仅依靠电压信息更能有效地维持母线电压稳定。

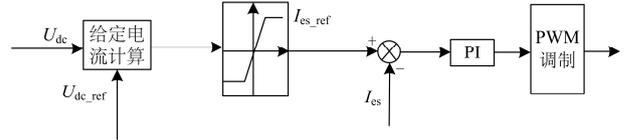


图 5 直流稳压控制框图

Fig. 5 Block diagram for DC bus voltage stabilization

### 4.2 电压跌落问题的治理

目前治理直流配电系统中出现的电压跌落问题的主要方法是针对储能装置和系统的协调控制算法进行改进。文献[39]提出一种基于光储协调控制的 LVRT 策略, 通过储能装置协调光伏列阵在不同工况下的控制方式, 解决直流配电网中的低电压穿越问题, 维持直流母线电压稳定。文献[40]针对储能装置提出一种基于 SOC 的改进下垂控制方法, 实现了储能装置的效益最大化, 将负荷功率在不同储能单元之间的动态分配, 有效防止了直流母线的电压跌落, 下垂系数和储能单元 SOC 的关系为

$$U_{dc1} = U_{dc}^* - (m_0 / SOC_1^n) P_1 \quad (6)$$

$$U_{dc2} = U_{dc}^* - (m_0 / SOC_2^n) P_2 \quad (7)$$

式中:  $U_{dc}$  为每台变换器的直流输出电压(以两个为例);  $m_0$  为当电池剩余容量为 1 时的初始下垂系数;  $P$  为经过低通滤波器滤波的输出有功功率。

在传统交流电能质量治理措施中, 除控制策略外, 还有专门针对电能质量问题的治理设备, 其中动态电压恢复器可以有效解决线路电压跌落问题。因此本文建议采用单独设计并添加直流动态电压恢复器解决直流系统的电压跌落问题。

### 4.3 谐波问题的治理

在直流配电系统中, 储能装置同样是解决系统谐波问题的有效方法。文献[41]提出储能装置的实时模糊控制算法, 全天的峰谷荷时段分配不同的储能输出功率, 这样在脉冲负载产生谐波时, 实时算法对超级电容的控制可以有效地缓冲谐波的影响, 提高网络电能质量。

目前, 有关直流配电系统的谐波研究较少, 但传统高压直流谐波的治理技术已经比较成熟, 因此可以借鉴到直流配电系统中。在治理传统高压直流

系统谐波问题的方法中, 比较常见的是在系统中添加无源滤波器和有源滤波器, 通过这些设备可以抑制直流线路中的谐波, 提高电网的电能质量。文献[42-43]将无源滤波器与有源滤波器有机结合, 二者相互补充构成直流有源电力滤波器, 主电路图如图6所示, 进一步提高了系统直流侧的滤波性能, 线路电流中的特征谐波明显减少, 直流电流纹波大大降低。在同样使用直流电的直流微电网中, 本文认为可以参考传统直流谐波治理措施, 在微电网中添加直流有源滤波器。

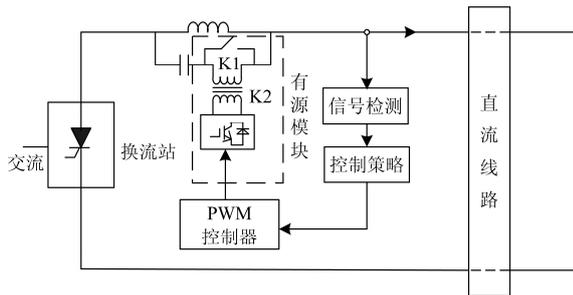


图6 直流有源滤波器主电路图

Fig. 6 Main circuit of APF

## 5 总结展望

近几年国内外对直流配电能质量的研究已经取得了发展, 本文认为可以在以下几个方面作深入研究:

1) 在参考现有交流电能质量的基础上, 提出更加准确全面的直流电能质量评价方法, 建立明确具体的直流电能质量的评价体系和标准。

2) 由于现在电网主要还是以交流为主, 应注重研究直流电网与交流电网之间电能质量的相互影响, 并研究相应解决方案。

3) 可以针对直流配电系统研发专门的治理设备, 如直流动态电压恢复器、直流配电系统有源滤波器等保证电网的电压稳定, 提高电能质量。

## 参考文献

- [1] DRAGICEVIC T, VASQUEZ J C, GUERRERO J M, et al. Advanced LVDC electrical power architectures and microgrids: a step toward a new generation of power distribution networks[J]. IEEE Electrification Magazine, 2014, 2(1): 54-65.
- [2] 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, 29(9): 19-25.  
WANG Dan, LIU Yiran, LIANG Xiang, et al. DC distribution network voltage class series[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 29(9): 19-25.
- [3] BOROYEVICH D, CVETKOVIĆ I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems a contemplative view[C] // 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Basov: IEEE, 2010: 1369-1380.
- [4] SANNINO A, POSTIGLIONE G, BOLLEN H J. Feasibility of a dc network for commercial facilities[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(5): 1499-1507.
- [5] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.  
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [6] 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.
- [7] 雍静, 徐欣, 曾礼强, 等. 低压直流供电系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 42-52.  
YONG Jing, XU Xin, ZENG Liqiang, et al. A review of low voltage DC power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 42-52.
- [8] 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.
- [9] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3066-3075.
- [10] KWASINSKI A. Quantitative evaluation of DC microgrids availability: effects of system architecture and converter topology design choices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 26(2): 835-851.
- [11] 谢少军, 肖华锋, 罗运虎. 直流楼宇技术初议[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 107-113.  
XIE Shaojun, XIAO Huafeng, LUO Yunhu. On DC-distribution technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 107-113.

- [12] 施婕, 艾芊. 直流微电网在现代建筑中的应用[J]. 现代建筑电气, 2010(6): 47-51.  
SHI Jie, AI Qian. Application of DC microgrid in modern building[J]. Modern Architecture Electric, 2010(6): 47-51.
- [13] WEISS R, OTT L, BOEKE U I. Energy efficient low-voltage DC-grids for commercial buildings[C] // 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids. Atlanta, USA: 2015: 154-158.
- [14] MENG Chao, YANG Yun, SUN Chunpeng, et al. Advantages and challenges of DC microgrid for commercial building[C] // 2015 IEEE First International Conference, Atlanta, GA: IEEE, 2015: 7-10.
- [15] 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.
- [16] 易桂平, 胡仁杰. 分布式电源接入电网的电能质量问题研究综述[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(1): 38-46.  
YI Guiping, HU Renjie. A survey of power quality problems in distributed power systems[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1): 38-46.
- [17] 秦鹏, 崔国柱, 郭昌林, 等. 光伏接入对配电网电能质量的影响及最大接入容量分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 145-150.  
QIN Peng, CUI Guozhu, GUO Changlin, et al. Influence of PV access on power quality of distribution network and analysis of maximum access capacity[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 145-150.
- [18] 雍静, 晏小龙, 曾礼强. 电压间谐波对紧凑型荧光灯光闪变效应的实验研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 273-281.  
YONG Jing, YAN Xiaolong, ZENG Liqiang. experimental study for flicker of compact fluorescent lamp caused by interharmonics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 273-281.
- [19] AHMED A, RADWAN A, ABDEL-RADY Y, et al. Linear active stabilization of converter-dominated DC micro grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 203-215.
- [20] MAGNE P, NAHID-MOBARAKEH B, PIERFEDERICI S. General active global stabilization of multiloads DC-power networks[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 27(4): 1788-1798.
- [21] 张海玉, 刘闯, 晁勤, 等. 具有 LVRT 能力的并网光伏系统继电保护问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 53-60.  
ZHANG Haiyu, LIU Chuang, CHAO Qin, et al. Research on relay protection issues of grid-connected photovoltaic system with LVRT ability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 53-60.
- [22] 陆晓楠, 孙凯, GUERRERO J, 等. 适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 35-42.  
LU Xiaonan, SUN Kai, GUERRERO J, et al. DC hierarchical control system for microgrid applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 35-42.
- [23] 李智诚, 和敬涵, 王小君, 等. 直流微电网的故障分析与保护配置研究[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(2): 62-68.  
LI Zhicheng, HE Jinghan, WANG Xiaojun, et al. Research on fault analysis and protection configuration of DC microgrid[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(2): 62-68.
- [24] 黄梅, 黄少芳. 电动汽车充电站谐波的工程计算方法[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 20-23.  
HUANG Mei, HUANG Shaofang. A harmonic engineering calculation method for electric vehicle charging station[J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 20-23.
- [25] FARHADI M, MOHAMMED O A. Real-time operation and harmonic analysis of isolated and non-isolated hybrid DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4): 2900-2909.
- [26] GRAHAM A D. The importance of a DC side harmonic study for a DC distribution system[C] // 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012), Bristol, 2012: 1-5.
- [27] DOERRY N. DC voltage interface standards for naval applications[C] // Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 2015: IEEE, 2015: 318-325.
- [28] IEC 60523-Ed. 2.0 en: 1999-electrical and electronic installations in ships-electromagnetic compatibility[S].
- [29] RICHTER B. Overvoltage protection concept for DC railway systems[EB/OL]. [2006-11-21].
- [30] 施婕, 郑漳华, 艾芊. 直流微电网建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 86-90.  
SHI Jie, ZHENG Zhanghua, AI Qian. Modeling of DC micro-grid and stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 86-90.
- [31] IEEE guide for analysis and definition of dc side harmonic performance of hvdc transmission systems

- IEEE Std 1124 TM—2003[S].
- [32] 姜喆, 尹忠东. 基于 F-AHP 的直流微电网电能质量综合评价[C] // 第三节全国电能质量学术会议暨电能质量行业发展论坛论文集, 2013, 8: 41-46.
- [33] 付学谦, 陈皓勇. 基于理想解法的电能质量综合评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 26-30.  
FU Xueqian, CHEN Haoyong. Comprehensive power quality evaluation based on TOPSIS approach[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 26-30.
- [34] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 基于突变决策的分布式发电系统电能质量综合评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 52-57.  
ZENG Zheng, YANG Huan, ZHAO Rongxiang. A catastrophe decision theory based power quality comprehensive evaluation method for distributed generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 52-57.
- [35] 张碧涵, 尹忠东, 赵海森. 低压直流供电系统的电能质量综合评估[J]. 电力建设, 2016, 37(5): 125-131.  
ZHANG Bihan, YIN Zhongdong, ZHAO Haisen. Power quality comprehensive evaluation for low-voltage DC power distribution system[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(5): 125-131.
- [36] 何吉彪, 程浩忠. 含微网配电网规划中的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 209-214.  
HE Jibiao, CHENG Haozhong. Comprehensive power quality assessment on distribution network planning containing micro-grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 209-214.
- [37] 文波, 秦文萍, 韩肖清, 等. 基于电压下垂法的直流微电网混合储能系统控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 892-898.  
WEN Bo, QIN Wenping, HAN Xiaoqing, et al. Control strategy of hybrid energy storage systems in DC microgrid based on voltage droop method[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 892-898.
- [38] SAHOO N C, MOHAPATRO S, SENAPATI M K. A SOC based voltage control strategy for DC microgrid[C] // 2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2015: 185-190.
- [39] 范柱烽, 毕大强, 任先文, 等. 光储微电网的低电压穿越控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 6-12.  
FAN Zhufeng, BI Daqiang, REN Xianwen, et al. Low voltage ride-through control of the photovoltaic/battery micro-grid system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 6-12.
- [40] 陆晓楠, 孙凯, 黄立培, 等. 直流微电网储能系统中带有母线电压跌落补偿功能的负荷功率动态分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 37-46.  
LU Xiaonan, SUN Kai, HUANG Lipei, et al. Dynamic load power sharing method with elimination of bus voltage deviation for energy storage systems in DC micro-grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 37-46.
- [41] MOHAMED A, SALEHI V, MOHAMMED O. Real-time energy management algorithm for mitigation of pulse loads in hybrid microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1911-1922.
- [42] 肖国春, 刘进军, 杨君. 高压直流输电用直流有源电力滤波器的研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 39-42.  
XIAO Guochun, LIU Jinjun, YANG Jun. The study on DC active filter for HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(1): 39-42.
- [43] 李辉, 吴正国. HVDC 系统中低成本串联混合型直流有源滤波器[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2341-2345.  
LI Hui, WU Zhengguo. Low cost series active DC filters in HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2341-2345.

收稿日期: 2016-08-02; 修回日期: 2016-10-19

作者简介:

姚钢(1977—), 男, 博士, 副研究员, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用;

纪飞鹏(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流电能质量。E-mail: jifeipeng9212@163.com

(编辑 周金梅)