

直流建筑变流器研究综述

张子琛

(北京交通大学 北京市海淀区 100044)

摘要: 直流供电系统电能质量高、损耗小、与储能系统匹配度高,近年来受到广泛关注。变流器在建筑供电系统中起重要作用,因此变流器的选择应用与提高配电系统效率,降低功耗息息相关,学者们对变流器的研究也越来越深入,在应用场景、工作原理等多方面进行了创新。本文首先对直流建筑中变流器的发展历程进行了概括。进而结合研究现状对未来直流建筑中变流器所具有的特点进行了分析,并对当前变流器在建筑配电方式中应用、变流器在建筑配电系统中产生振荡的解决、变流器在配电系统中的拓展应用研究现状进行了详细介绍。最后,讨论了未来直流建筑以及变流器的重要问题与发展前景。

关键词: 变流器; 变换器; 直流建筑; 柔性直流电

Review of DC building converter research

ZichenZhang

Beijing Jiaotong University Haidian District, Beijing 100044

Abstract: The DC power supply system has attracted wide attention in recent years due to its high power quality, low loss and high matching with the energy storage system. The converter plays an important role in the building power supply system, so the selection and application of the converter is closely related to improving the efficiency of the distribution system and reducing power consumption. Scholars have also made more and more in-depth research on the converter, and have made innovations in application scenarios, working principles and other aspects. In this paper, the development process of converter in DC building is summarized firstly. Then the characteristics of the converter in the future DC buildings are analyzed in combination with the current research situation, and the current application of the converter in the building distribution mode, the solution of the oscillation generated by the converter in the building distribution system, and the expansion and application of the converter in the distribution system are introduced in detail. Finally, the important issues and development prospects of DC buildings and converters in the future are discussed.

Key words: converter; Converter; DC building; Flexible DC

一、引言

近年来,楼宇耗电给城市配电网带来了巨大的压力。同时,国家在战略层面提出的“碳达峰、碳中和”战略、“能源革命”战略、“配电网建设改造”行动计划,建筑配电系统是城市电网供电的重要组成部分,直流配电建筑的建设也被提上日程,如果变流器选择不当,直接影响到资源的可持续发展。因此,在当前能源利用形式日益严峻的背景下,找到合适的变流器工作方式,以此提高能源利用率,具有紧迫性和重要性。

因此,本文从现有文献资料出发,在分析现有文献研究成果的基础上,从建筑配电系统、柔性直流电配电技术、变流器的工作应用及改进等方面总结出直流建筑配电系统中变流器的发展现状。

二、变流器在直流建筑中的发展及特征

2000年初,就有学者提出了变流器应用于建筑配电的初步构想。后来,人们对变流器应用、变流器关键技术以及直流建筑的认识得以发展。虽然直流建筑从未被明确定义,但是这种以变流器为基础,顺应信息流融合趋势的新型建筑已经逐渐形成共识。现已有许多低压变流器配电系统的建筑项目投入实际使用。这些工程项目中,初期功能比较单一,主要在示范低压直流配电系统在建筑中应用的可行性。随着我国变流器的不断发展,以及电力系统终端负荷的不断变化,综合研究与示范工程不断涌现,如深圳建科院未来大厦R3办公模块已投入科研使用。未来的直流建筑变流器将具有以下核心特征:1)采用低压变流器系统;2)建筑入口有AC/DC变流器;3)变流器可对外供电。

三、研究现状

1. 关于建筑配电中变流器应用的研究

1) 应用变流器配电前后系统能效的对比

直流配电系统关键是变流器进行AC至DC的转换。

国内学者李海波认为,在考虑到商业楼宇交流与直流配电系统的拓扑结构差异的情况下,基于商业楼宇交直流配电系统的典型结构,并结合商业楼宇的负载特性及时间序列特点,建立了综合考虑多分支潮流分布的系统级能源效率计算模型,并给出了“源-网-荷-储”的综合能源效益评价指标及评价方法^[1]。

文章所探讨的能效定义为计及线路损耗与电力电子器件损耗之后的楼宇配电系统传输效率,计算公式为:

$$\eta = \frac{E_D}{E_D + E_{loss,L} + E_{loss,C}} \times 100\% \quad (1)$$

文章提出了一种以时序模拟为基础的商用建筑配电网节能评价方法,针对分布式电力系统的各种特点,对电力损失进行了评价,得到周期中的能源效率指数。该文章成立了一套针对商业楼宇交流和直流配电体系的能效评估方式,从定量角度,阐发了利用变流器配电先后,体系能效的差别,为未来楼宇配电系统设置提供了理论支撑。但是此文章立足于交直流配电方式性能比较,没有将直流交流混合情况下能效情况考虑在内。

2) 变流器在直交混合系统中应用的研究

对于建筑直交混合的配电方式,我国学者陈红坤进行了展望^[2]。在此基础上,本学者探讨了选择变流器的整流原理,探讨了建筑电源中低压配电时的临界点选择原则,以及在引入变流器时应注意的问题。在混合供电系统中,交、直流负荷的比例,随直流电压选择差异而有所区别。

其文章还根据人体安全、电路安全要求提出了超低压、低压变流器整流配电电压上下限,并指出楼宇中引入直流电压时的有关注意事项。

2. 变流器产生柔性直流电振荡问题的解决

柔性直流电是一种以变流器为核心的直流输电模式。变流器使用过程中会产生谐波电流和高频电磁波，污染电磁环境和电网。所以，除发展变流器技术以外，也要注重谐波抑制的研究。

1) 变流器引发电谐振的研究

柔性直流输电技术中，基于模块化多电平变流器(Modular Multilevel Converter, MMC)引发的谐振问题尤为突出。

我国学者刘岳坤将 MMC 控制回路与桥臂动态过程的频率耦合效应考虑在内，使用多谐波线性化方法，建立了 MMC 从交流侧端口看过去的宽频段内频率耦合导纳矩阵模型，同时定义了频率耦合系数，分析了 MMC 参数对耦合效应的影响，提出了一种基于功率环对称控制的频率耦合抑制方法。

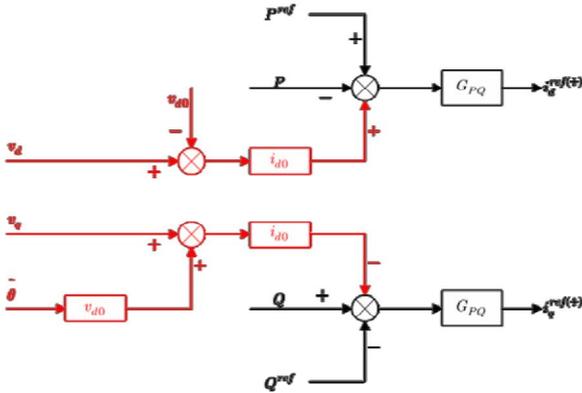


图 1 功率环对称结构

2) 变流器在建筑配电中产生高频振荡的研究

我国学者候延琦根据电流内环控制建立换流器高频阻抗简化模型，从原理上分析附加阻尼控制环节对抑制系统高频振荡现象的局限性，并且通过分析滤波装置外特性需求，提出用 RLC 二阶高通滤波器来抑制高频振荡现象。

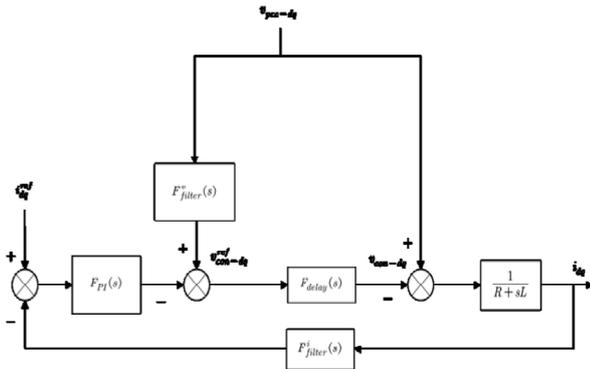


图 2 MMC 简化内环控制

图 2 中， F_{filter}^v 和 F_{filter}^i 分别代表前馈电压滤波环节和前馈电流滤波环节，属于附加控制； F_{delay} 代表控制系统的总链路延时； v_{pcc-dq} 为交直流系统 PCC 点电压的 dq 轴分量； R 为线路等效电阻； L 为线路等效电感，包含变压器漏感和桥臂电感。以 v_{pcc-dq} 为输入， i_{dq} 为输出。 sL 恒为 90° 不变，频率增大时幅值随之呈线性增大规律，在高频段起决定性作用。不考虑附加阻尼控制策略的作用 MMC 的高频阻抗模

型为：

$$Z_{MMC}(s) = \frac{sL}{1 - \cos(2\pi Tf) + j \sin(2\pi Tf)} \quad (2)$$

当交流、直流系统具有相同的阻抗时，在频率点上的相位差异小于 180 度时，谐振的可能性较大。

前馈电流滤波器是 ZMMC 分子中的一个重要因素，而在高频部分，它对分子的影响很小，不适合抑制系统的高频振荡。

其文章又逐一一对几种可能的附加阻尼控制进行分析。

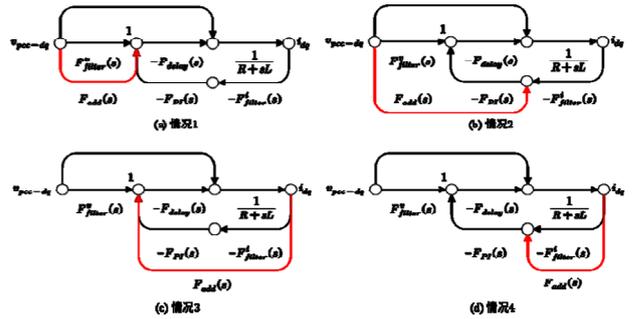


图 3 附加控制信号流程图

利用 Mason 公式得到以上 4 种情况下 MMC 简化等效阻抗表达式：

$$\begin{cases} Z_{MMC}(s) = \frac{R + sL + F_{filter}^i(s)F_{delay}(s)F_{PI}(s)}{1 - [F_{filter}^v(s) + F_{add}(s)]F_{delay}(s)} \\ Z_{MMC}(s) = \frac{R + sL + F_{filter}^i(s)F_{delay}(s)F_{PI}(s)}{1 - [F_{filter}^v(s) - F_{add}(s)]F_{PI}(s)F_{delay}(s)} \\ Z_{MMC}(s) = \frac{R + sL + [F_{filter}^i(s)F_{PI}(s) + F_{add}(s)]F_{delay}(s)}{1 - F_{filter}^v(s)F_{delay}(s)} \\ Z_{MMC}(s) = \frac{R + sL + [F_{filter}^i(s) - F_{add}(s)]F_{PI}(s)F_{delay}(s)}{1 - F_{filter}^v(s)F_{delay}(s)} \end{cases} \quad (3)$$

附加链作用于阻抗表达式的分子，在高频部分的影响很小。电压的附加环节功能类似于前馈滤波器，其补偿效果并不显著。综上所述，附加控制环节不适用于抑制高频振荡现象。

其文章还提出了滤波器的参数优化设计方法，认为选取品质因数为 1 更符合抑制高频振荡的需求。

MMC 阻抗在基频和 高频段的幅值： $|Z_{MMC1}|$ 和 $|Z_{MMCCH}|$ ，按照滤波器外特性要求，可以得到滤波器补偿量的选择区间：

$$\frac{U_N^2 q}{K_H |Z_{MMCCH}| n_0} \leq Q \leq \frac{U_N^2}{K_I |Z_{MMC1}|} \quad (4)$$

在方程式中 K_I 和 K_N 分别代表基频及高频段的滤波器阻抗的幅度裕度。在质量因数、截止频率、补偿能力等条件已知 的情况下，可通过计算得到 R、L、C 参数。

利用上述方法所确定的滤波器参数，可以在减少设备损耗的情况下，改善系统的阻尼，减少抑制设备的高频振荡，降低设备的经济费用。

3) 变流器高、低频谐振的深入研究

我国学者李岩对谐振进行了更为深入的研究^[5]。

对于低频振荡，柔性直流电在弱电网中的适应能力与控制方法以及参数有着密切的关系。因此，在使用柔性直流电时，要选择合理的控制方法，以及考虑弱电网的边界，避免参数不

当引发低频谐波。

对于高频振荡，柔性直流输出阻抗与控制链路延时密切相关，所以我们在设计系统时，充分考虑高频振荡的概率，要严格把控延时时间，预防和抑制高频振荡。

3. 变换器在直流建筑配电中的拓展应用

1) 单电感多输入 Buck-Boost 变换器

我国学者易灵芝，为提高供电效率，实现分布式电源联合供电的功能，以双输入的变换器模型为例，推导并且总结出输入输出特性和实际工作景况下对功率进行均衡的能力，提出了使用风电能对直流建筑进行混合配电的基本控制策略。并从双输入变换器进行延伸，通过拓扑推演过程得到了 n 路输入 Buck-Boost 变换器的模型^[6]。

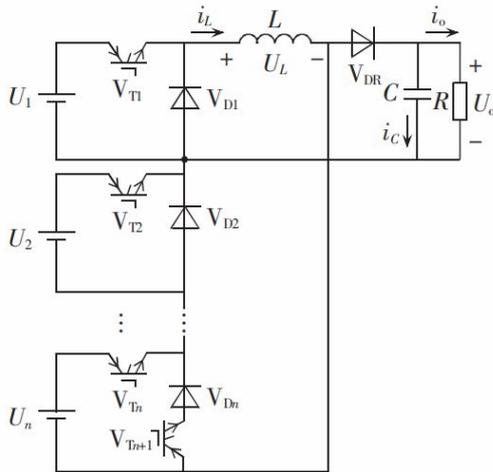


图4 新型多输入 Buck-Boost 变换器

Buck-Boost 直流变换器，是一种具有单电感的 n 路输入电路。有多种输入源独立供电以及协作供电两种模式，同时解决了典型 Buck-Boost 电路某些情况下的极性倒置的问题。

2) 直流-直流转换器在 PV-DCBM 中的应用

为提高 BIPV 系统的能效性，我国学者提出了一种基于光伏直流构建模块(PV-DCBM)的 BIPV 系统的新概念，以实现更经济有效的系统配置^[7]。

为了利用基于 PV-DCBM 的 BIPV 系统的优势，需要一个直流电压增益高、输入波纹低、拓扑结构紧凑、转换器效率高、使用寿命长的高阶直流-直流转换器。

在变换器拓补结构选择上，我国学者通过比较，最终认为选择隔离拓补的电流馈电的半桥式拓补结构较为合适。

4. 关键问题

1) 存在的问题

目前，阻碍直流建筑配电产业中变流器发展的有如下方面。

- (1)直流建筑变流器标准的缺失。
- (2)变流器应用产生振荡现象。

2) 未来发展趋势

(1)将变流器应用于直流建筑的配电系统的发展方向已经达成共识，但是国内对于此方向的研究仍然处于初步阶段，设计控制、经济成本等方面仍然需要继续探索。

(2)发展变流器的同时也要考虑到成本经济问题，如变压困难以及直流灭弧问题的解决，需要在未来的研究中不断探索经济高效的解决办法。

(3)探索故障检测技术。建筑应用变流器进行直流配电的故

障检测与交流有很大区别。

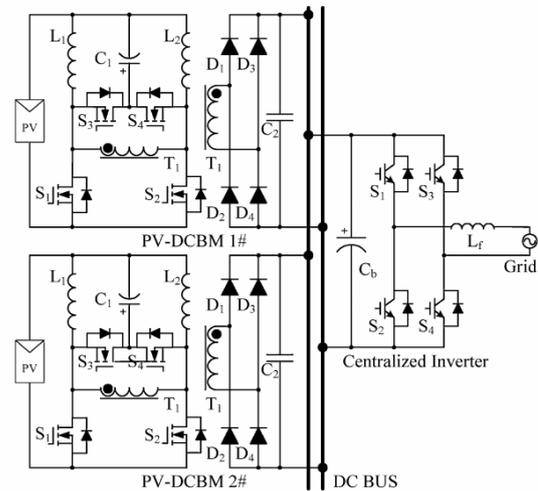


图5 基于光伏 DCBM 系统的实验原型拓补

5. 结论

该文首先对变流器在建筑配电应用中的发展历程进行了介绍；然后，根据目前的研究状况，分析了今后直流工程中采用的变流器的特性，并对目前的研究状况作了较为详尽的阐述；最后，对变流器未来发展中的重要问题进行了探讨，并得出结论：

- (1)现如今交流配电仍是主流建筑配电方式，在未来发展中，变流器在建筑配电系统的应用将越来越广泛。
- (2)变流器产生谐振是存在的最主要问题，学者针对低频谐振、高频谐振不同分类进行了相关问题的解决。
- (3)变流器广泛应用于建筑配电系统中，除了将交流电变为直流电外，在 PV-DCBM、多输入配电系统中也有应用。

参考文献：

[1]李海波,赵宇明,刘国伟,蒋世用,赵政嘉. 基于时序仿真的商业楼宇交流与直流配电系统能效对比[J]. 电工技术学报, 2020,35(19):4194-4206.

[2]陈红坤,何桂雄,石晶,闫华光. 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.

[3]刘岳坤,汪娟娟,王泽昊,陈威,叶运铭,傅闯,冯俊杰. 定功率控制下柔性直流输电系统交流侧导纳矩阵建模及频率耦合抑制策略研究[J/OL]. 中国电机工程学报:1-14[2022-07-12]

[4]侯延琦,刘崇茹,王宇,孔玮. 柔性直流输电系统高频振荡抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(11):3741-3751.

[5]李岩,邹常跃,饶宏,许树楷,洪潮,黄立滨,李巍巍. 柔性直流与极端交流系统间的谐波谐振[J]. 中国电机工程学报,2018,38(S1):19-23.

[6]易灵芝,何东,王书颢,刘颀,许芬. 面向直流楼宇供电技术的新型多输入 Buck-Boost 变换器[J]. 电力自动化设备,2014,34(05):86-92.

[7]B. Liu, S. Duan and T. Cai. Photovoltaic DC-Building-Module-Based BIPV System- Concept and Design Considerations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(5): 1418-1429.

作者简介：张子琛，(2002.4-)，女，汉族，山东潍坊人，北京交通大学本科在读，电气工程专业新能源方向。