

应用于交直流配电网的无变压器多端口能量路由器的关键技术研究

侯丹, 任军辉, 孙小平, 张树楠, 王文萃, 杨帆, 李喜喜, 王永新
西安西电电力系统有限公司, 陕西省西安市西三环辅道2号 邮编: 710000

Research on key technologies of transformer free multi-port energy router used in AC / DC distribution network

Hou Dan, Ren Junhui, Sun xiaoping, Zhang shunan, Wang wencui, Yang fan, Li xixi, Wang yongxin

XIAN XD POWER SYSTEM CO., LTD., XI'AN.

摘要: 针对传统配电网无法满足新型配电需求, 提出了基于多端口能量路由器的新型配电网组网形式。给出了多端口能量路由器模块数计算方法以及接地方式设计。同时为解决传统变压器的体积大、噪声大等问题, 提出无变压器多端口能量路由器的解决方案, 并从稳态运行、对称故障以及非对称故障方面论证了无变压器多端口能量路由器的可行性。同时针对长时间非对称故障提出零序电压抑制, 降低直流电压以及暂时性闭锁等多种解决方案, 并进行了相关的仿真验证。

关键词: 多端口能量路由器; 无变压器; 零序电压抑制

ABSTRACT: To deal with that the traditional distribution network cannot meet the new needs, a new distribution network form based on multi-port energy router is proposed. The calculation method of the number of modules of multi-port energy router and the design of grounding mode are given. At the same time, in order to solve the problems of large volume and high noise of traditional transformers, a solution of transformer free multi-port energy router is proposed, and the feasibility of transformer free multi-port energy router is demonstrated from the aspects of steady-state operation, symmetric fault and asymmetric fault. At the same time, a variety of solutions such as zero sequence voltage suppression, DC voltage reduction and temporary blocking are proposed for long-term asymmetric faults, and the relevant simulation verification is carried out.

KEY WORD: Multi-port energy router; transformer free; Zero sequence voltage suppression

1 背景

现有的配电网采用放射状、弱连接的形式, 无法满足新型电力系统背景下大规模新能源的接入和消纳, 同时存在不同电压等级的交流系统联网困难, 供电可靠性低等问题^[1], 亟需新型配电网形式出现。

传统的 MMC (modular multilevel converter) 拓扑一般会配置变压器, 变压器用于电压变换和隔离^{[2]、[3]、[4]}, 由于传统的变压器存在体积大, 噪声大等缺点, 在配电网应用场合中并不友好。

针对上述问题, 提出了基于多端口能量路由器的新型配电网形式。并通过采用全桥拓扑以及相应的控制算法等手段, 提出无变压器的多端口能量路由器, 具有体积小、噪音小等优点。

2 多端口能量路由器端口电压等级选择

从系统需求的角度看, 多端口能量路由器需要连接不同电压等级的交流端口以及直流端口。在配电网中, 常见的中压交流电压等级有 10kV 和 20kV 等, 常见的中压直流电压等级有 $\pm 5kV$ 和 $\pm 10kV$ 等。常见的低压直流电压等级有 $\pm 1500V$ 、 $\pm 750V$ 、 $750V$ 等, 常见的低压交流电压等级有 380V、690V 等。

多端口能量路由器需要完成交流与直流的相互转换。在中压部分一般采用 MMC 拓扑完成交直流之间的转换。MMC 中交流电压的选择一般按照项目的实际需求, 连接两个或多个交流电网, 根据交流电网的实际电压等级确定。直流电

压的选择一般需要与交流电压相匹配，同时需要考虑器件选型等综合因素。

低压直流电压根据实际项目的需求进行选择，一般负荷较多的情况下低压直流输出端口可以采用真双极方案，增加系统的可用率，在负荷较少的情况下也可以采用对称单极方案。低压直流电压一般采用从中压直流通过 DCDC 变换器变换获得。目前 DCDC 变换器一般采用隔离型 Dual Active Bridge（双有源桥，以下简称 DAB）拓扑。

3 系统主接线设计及主要的设备选型

本文以配电网中一个典型的应用场景为例，探讨一下系统主接线的的设计和选型。设定该多端口能量路由器需要连接 4 个端口，其中两个交流端口和两个直流端口。交流端口分别为 10kV 交流端口 A 和 20kV 交流端口 B。直流端口分别为 $\pm 10\text{kV}$ 直流端口 C 和 750V 直流端口 D。

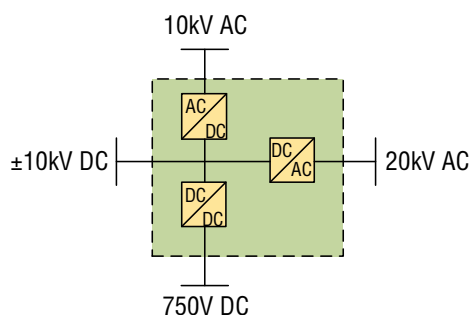


图 1 多端口能量路由器系统图

Fig 1 System diagram of multi-port energy router

3.1 系统模块拓扑及数量计算

首先交流端口采用无变压器的 MMC 拓扑，因此不能采用变压器进行电压的变换。因此存在 20kV 侧的交流电压与 $\pm 10\text{kV}$ 直流电压之间的电压差异，20kV 交流侧的 MMC 换流器需要据具备降压运行的能力，因此需要采用具有负电压输出功能的全桥拓扑模块。

系统的模块数计算需要考虑器件耐受电压和电流的能力，同时考虑模块数对于交流电压和电流的谐波影响。在配电网系统中一般采用 20 个以上的模块数可以满足谐波的要求。

考虑无变压器系统需要全桥模块端口输出负电压，同时考虑在故障工况下，确保器件不出现过电压以及过电流的情况，可以计算出需要的

全桥模块数，一般 70-80%左右的全桥模块数可满足日常降压运行的要求以及故障情况下的运行要求。

同时兼顾经济性考虑和系统维护以及备件等方面的因素，系统模块可采用 100%全桥模块的方案。

3.2 系统的接地设计

3.2.1 中压部分接地设计

针对中压部分的接地设计，由于交流端口没有配置变压器，交流侧没有现成变压器中性点可以用于接地设计，而系统重新配置中性点接地设备较复杂，因此采用中压直流侧接地的方式。

考虑到原有的交流系统中存在交流侧接地的情况，在能量路由器接入交流系统的运行工况下，中压直流侧采用不接地运行方式。

在能量路由器运行在孤岛运行方式，即通过低压直流光伏或储能给交流负荷供电的运行方式，孤岛系统不会连接原有的交流侧的接地装置，因此需要通过直流侧接地提供可靠的对地电位。

综上所述，中压直流侧通过大电阻接地，同时该接地电阻配置开关，可以在联网的运行方式下切除直流接地电阻，在孤岛运行方式下投入中压直流的接地电阻，以适应系统的实际运行状况。

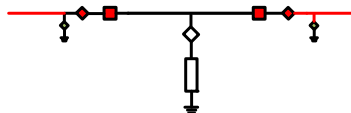


图 2 中压直流接地示意图

Fig 2 MV DC grounding diagram

3.2.2 低压部分接地设计

低压直流母线采用的是 750V 的电压等级，连接着 DCT 的低压直流出口，同时还有光伏、储能以及充电桩等设备接入。

出于人身安全的考虑，直流设备的直流绝缘监测已经成为新能源领域保证设备安全运行的必备功能。同时在各项标准中已经明确要求相应的新能源直流系统必须具备绝缘监测功能，包括光

伏、储能以及充电桩^{[5]-[9]}。

按照标准规定，接入低压直流母线上的主要设备，包括光伏、储能以及充电桩均需要配置绝缘监测，因此750V端口采用不接地设计。

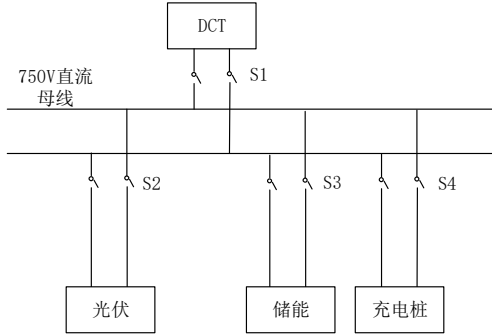


图3 低压直接地示意图

Fig 3 LV DC grounding diagram

3.3 无变压器方案的性能分析

如上所述，多端口能量路由器采用无变压器的连接方式，在不同的运行工况以及故障工况下是否存在问题，下文分别从稳态运行工况，对称故障以及非对称故障几个方面进行分析和仿真验证。

3.3.1 稳态运行工况

在稳态运行工况下，10kV换流器部分和20kV换流器部分是通过中压直流部分进行隔离的。

对于10kV侧，其交流部分是10kV，其直流部分是±10kV，因此正常工作时，10kV换流器部分可以完全按照10kV等级的安规设计和运行。无变压器方案不会影响稳态运行的性能。

对于20kV侧，交流电压是20kV，其直流部分也是±10kV，其交流电压和直流电压之间的电压差是由全桥模块电容电压承受的。因此稳态运行时，20kV换流器部分可以完全按照20kV等级的安规设计和运行。MMC换流器运行在降压运行模式。无变压器方案也不会影响稳态运行的性能。

3.3.2 对称故障分析

按照故障类型的不同，将故障分为对称故障和非对称故障。

对称故障一般包含交流侧的三相对地故障以及中压直流部分的正负极线的短路故障。

例如交流网侧三相对地故障的情况下，如果

发生在功率受端，则短时内功率传输受阻，功率送端的有功功率无法有效送出，中压直流电压会出现暂时的过电压，此时系统会根据当前的运行工况，通过降低送端有功功率输入以及增加其他受端的有功功率输出的方式，快速调整系统的功率流从而达到新的功率平衡，可以有效的控制直流电压恢复至正常的电压范围，因此不会出现严重的过电压。如果故障发生在送端，则对于直流部分相当于输入功率突然减小，出现短时的输入功率小于输出功率的情况，因此直流电压会出现一定程度的降低，这时控制系统也会快速的调整输出功率，使得直流电压迅速的恢复到正常的电压范围，因此故障过程中不会出现严重的过电压以及欠电压的情况。在上述分析过程中，无变压器方案不会对上述故障特性产生影响。同时对于直流双极故障以及阀侧三相对地故障，无变压器方案也不会产生导致系统故障也行的明显差异。

因此，在对称类故障情况下，无变压器方案 and 传统方案相比，其故障特性是基本类似的，因此针对对称故障，无变压器方案对系统的设计与运行没有明显的影响。

3.3.3 非对称故障分析

非对称故障以单相交流故障为例，当20kV侧出现交流单相接地故障后，系统的故障相对地电压会变成零，非故障相的对地电压由相电压变为线电压，系统的对地电压为非对称电压，含有零序分量，由于采用了无变压器方案，因此无法有效的阻止零序分量从故障的交流侧传递至直流侧以及非故障的交流侧。

因此，在20kV侧出现故障的情况下，直流线路的对地电压也会和10kV侧的交流对地电压上也会叠加上零序电压。这会增加直流侧以及10kV侧的系统对地电压水平。

通过仿真，可以看到直流母线的对地电压最高至24kV，同时10kV的交流侧的对地电压的最高值为21kV。一般10kV交流系统的短时工频耐受电压为35kV，交流侧避雷器的动作电压为25kV，因此上述的短时过电压不会影响10kV交流系统的绝缘设计和正常运行。同时直流电压的最高值也在设计范围之内。

如果是10kV侧出现单相交流故障，由于10kV的电压比20kV的电压低，因此20kV的交

流系统的过电压仅为 1.3pu 左右，不会对其绝缘等产生明显的影响。

综上所述，对于短时非对称故障，20kV 侧的交流故障相较于 10kV 侧的交流故障会更严苛一些，但是无论是直流侧的对地电压还是对侧交流的对地电压的最大值都在短时耐压的范围之内，不会对系统造成损坏。

但是如果非对称故障的持续时间比较长，例如单相交流故障持续时间可以达到 2 小时，这种长时间故障导致的过电压会对 10kV 侧的设备耐压造成一定的压力。

那么这种情况下，可以通过以下几种解决方案解决设备的过压问题：

(1) 加入零序电压抑制策略：

在单相接地故障期间，根据上述分析，由于故障相导致的零序电压如果不增加额外的控制会通过直流侧传递给对侧的交流系统。由于 20kV 侧的交流电压高于 10kV 侧，因此 10kV 侧在对侧出现故障的情况下需要承担一定的电压应力，这种情况可能通过加入零序电压抑制策略进行有效的改善。

下图是零序电压抑制算法的示意框图，从图中可以看出，从交流对地电压中分解出零序分量，通过控制器，得到零序电压抑制的补偿量，叠加到原有的输出电压控制指令中，从而起到零序电压抑制的效果。

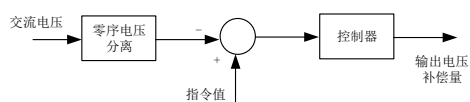


图 4 零序电压抑制策略示意图

Fig 4 Schematic diagram of zero sequence voltage suppression strategy

下面的仿真波形可以看出，在没有加入零序电压抑制策略之前，当 20kV 侧出现交流的单相对地故障时，直流电压和 10kV 的交流电压都会有明显的过电压，加入零序电压抑制策略之后，该过电压得到有效的抑制。

加入零序电压抑制策略之后，需要 20kV 侧换流阀增加一定的模块，以保证零序电压抑制策略使能期间不出现过调制。这会对造价和尺寸会产生一定的影响。

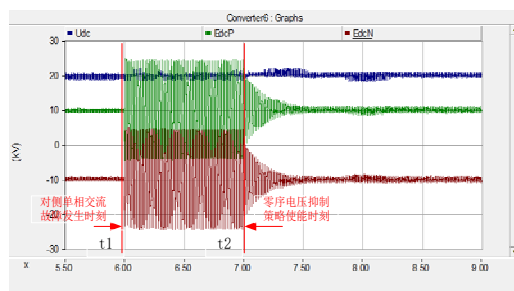


图 1 20kV 交流侧单相接地故障后的直流电压波形图 (Udc 为正负极之间的电压, EdcP 为正极对地电压, EdcN 为负极对地电压)

Fig 1 DC voltage waveform after single-phase grounding fault at 20kV AC side (Udc is the voltage between positive and negative poles, Edcp is the positive pole voltage to ground, EdcN is the negative pole voltage to ground)

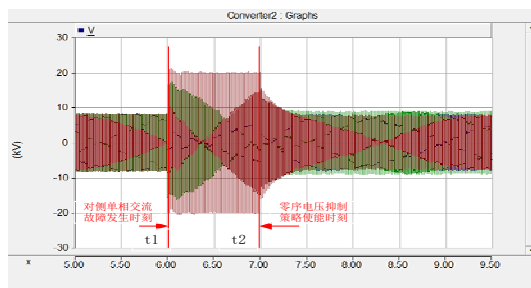


图 2 20kV 交流侧单相接地故障后的 10kV 交流侧对地电压波形图 (零序电压抑制)

Fig 1 Waveform of 10kV AC side to ground voltage after single-phase grounding fault at 20kV AC side (zero sequence voltage suppression)

(2) 降低直流母线电压：

针对上述的长期单相接地故障，另一个方法是在故障期间，降低直流电压，由于两侧的换流阀均采用全桥模块，所以支持直流电压降压运行模式^[10]，直流电压降低之后，相应的过电压情况可以得到有效的改善。但是在重载工况下，该方案会影响能量路由器交换的功率。因此，该方法比较适合轻载的情况。

(3) 20kV 换流器暂时退出运行：

针对上述的长期单相接地故障，还可以在故障期间，暂时闭锁故障侧换流站，通过闭锁保护其他部分不受过电压的影响，待故障清除后重启。相关的仿真波形如下所示。可以看出 6s 是 20kV 交流侧发生单相对地故障的时刻，7s 是 20kV 换流器闭锁时刻，可以看出，闭锁后系统的过电压问题得到解决。该方案会影响能量路由器故障端口的有功和无功交换，对其他非故障端口没有影响。

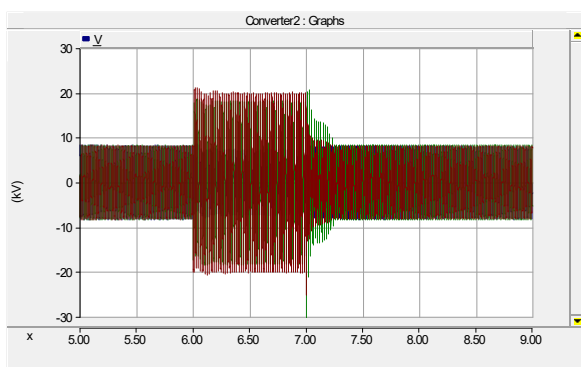


图 3 20kV 交流侧单相接地故障后的 10kV 交流侧对地电压波形图（暂时性闭锁）

Fig 1 Waveform of 10kV AC side to ground voltage after single-phase grounding fault at 20kV AC side (temporary blocking)

上述三种解决方案各有利弊，相关的对比如下表所示：

表 1 三种解决方案对比表

Tab 1 Comparison of three solutions

方案	优点	缺点
零序电压抑制	不影响功率交换	增加模块，增加成本和体积
降低直流电压	无需增加成本	影响功率交换
闭锁故障换流器	无需增加成本	影响功率交换

4 总结

本文针对多电压等级的交直流混合配电网系统，提出了一种无变压器的多端口能量路由器。多端口能量路由器可以连接不同电压等级的交流电网以及直流电网，提升配电系统的供电容量、可靠性以及能效性。给出了多端口能量路由器的端口电压等级以及模块数的确定原则。给出了多端口能量路由器的接地设计方法。提出的无变压器方案可以解决传统变压器带来的体积大、噪声大等问题，减小多端口能量路由器的体积、噪声以及变压器带来的损耗。并针对无变压器方案分别从稳态运行、对称故障以及不对称故障等多个

方面，分析其性能，并通过仿真验证方案的可行性。

参考文献

- [1] 张祖平, 范明天, 周莉梅. 城市电网电磁环网的解环问题研究[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 42-44.
Zhang Zuping, Fan Mingtian, Zhou Limei. Research of breaking up electromagnetic ring in urban power network in 2008[J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 42-44(in Chinese).
- [2] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.
Xu Zheng, Chen Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Technology, 2007, 33(1): 1-10(in Chinese).
- [3] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
Tang Guangfu, He Zhiyuan, Pang Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14(in Chinese).
- [4] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 24-45.
- [5] NB/T 32003-2018 《光伏发电并网逆变器技术规范》
- [6] GB/T 36558-2018 《电力系统电化学储能系统通用技术条件》
- [7] GB/T18487.1-2015 《电动汽车传导充电系统 第一部分: 通用要求》
- [8] GB/T 18384.3-2015 《电动汽车安全要求 第 3 部分: 人员触电防护》
- [9] GB/T 31467.3-2015 《电动汽车用锂离子动力电池包和系统 第 3 部分: 安全性要求与测试方法》
- [10] 孔明, 汤广福, 贺之渊. 子模块混合型 MMC-HVDC 直流故障穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5343-5351.
Kong Ming, Tang Guangfu, He Zhiyuan. A DC fault ride-through strategy for cell-hybrid modular multilevel converter based HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5343-5351(in Chinese).

收稿日期: 2022.08.05

作者简介:

侯丹 (1982-), 女, 河南永城, 硕士, 高级工程师, 电力系统中电力电子设备的相关系统研究与仿真