

面向未来高压直流互联的端对端电力电子拓扑

孙琳,张昌栋,张彬荣,邱志鹏,赵新贞

(国网济南供电公司,山东 济南 250012)

摘要: 高压直流输电,特别是采用模块化多电平变流器的电压源变换器(VSC)技术取得了重大进展。为了更好地深化使用可再生能源,人们越来越多地需要将现有的高压直流输电线路互连到网状的高压直流电网中。介绍了一系列基于端对端VSC结构的电力电子拓扑,作为未来直流互联的元器件。拓扑结构包括DC/DC变换器、DC/DC自耦变压器、直流潮流控制器和高压直流电源分接头。讨论了这些拓扑稳定运行的控制方案。仿真结果验证了所提出控制方案的有效性。

关键词: 端对端;高压直流;高压直流互连;高压直流分接头;模块化多电平变流器;多端;电力电子;潮流控制器

中图分类号:TP72 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqed18859

Front-to-front (FTF) Power Electronic Topologies for Future HVDC Interconnections

SUN Lin, ZHANG Changdong, ZHANG Binrong, QIU Zhipeng, ZHAO Xinzhen

(State Grid Jinan Power Supply Company, Jinan 250012, Shandong, China)

Abstract: Significant progress has been made in HVDC transmission, particularly to voltage-source-converter (VSC) technology using modular multilevel converters. There is increasing demand to interconnect the existing HVDC lines into meshed HVDC grids for better renewable energy penetration. A series of power electronic topologies, all based on the front-to-front VSC structure, were introduced as devices for future HVDC interconnections. The DC/DC converter, DC/DC auto-transformer, DC power flow controller and HVDC power tap were included in the topologies. The control schemes for stable operation of these topologies were also discussed. Simulation results validate these topologies and establish the effectiveness of the proposed control schemes.

Key words: front-to-front(FTF);high voltage direct current(HVDC);high voltage direct current interconnections; high voltage direct current tapping; modular multilevel converter(MMC); multi-terminal; power electronics; power flow controller (PFC)

交流电的主要优点是可以通过交流变压器简单地改变电压电平,如图1a所示,为降低线路损耗,可使输电电压高、配电电压低,以保证安全。1972年世界上第一个采用晶闸管换流的伊尔河背靠背(BTB)直流工程在加拿大投运^[1],如图1b所示,BTB配置的电力电子转换器提供了另一种通过直流链路连接不同交流系统的方法。BTB系统的基本原理是利用功率变换器,即整流器和逆变器,实现交流到直流的转换,反之亦然。BTB变换器不仅可以升压/降压,而且还可以作为变频器,因此在可再生能源发电中得到了广泛应用,例如高压直流输电^[2-5]、工业电动机驱动^[6]。

由于高压直流线路在极远距离的损耗比等

效交流线路低,并且能够在地下或水下运行,因此到目前为止,全世界已安装了100多个BTB高压直流输电项目^[7]。基于模块化多电平变流器(MMC)的电压源变换器(VSC)技术^[8-10]引起了用于海上风电场集成的VSC-HVDC技术和不同国家间电网互联的热潮。VSC-HVDC不仅被配置为点对点,而且还可以为多终端^[11]。此外,预计将来会更大规模地开发VSC-HVDC,以建立连接多个交流系统的直流网络,从而促进各国和各大洲之间更高的渗透率和更有效地分享间歇性可再生资源^[12-13]。

类比交流系统中的交流变压器,直流系统也需要这样一个装置实现在不同直流电网之间交

换电力^[14]。由于直流电压不易改变,必须依靠电力电子技术。虽然DC/DC电力电子变换器已经在低功率水平上得到了广泛的研究和应用,并且存在着大量的拓扑结构,但由于半导体损耗、成本和电压额定值的限制,这些拓扑大多不适合放大到高电压和MW级功率水平。最近,端对端(FTF)配置的概念出现了^[14-17]。如图1c所示,该结构有希望用于高压直流互连。FTF可被认为是BTB的对偶,它在2个VSC之间使用一个交流链路。VSC可以采用MMC拓扑结构,满足了效率、可靠性、高电压、大功率的要求^[18-20]。另外,如果需要较大的直流电压转换比,可以在交流链路中插入交流变压器进行电压匹配。

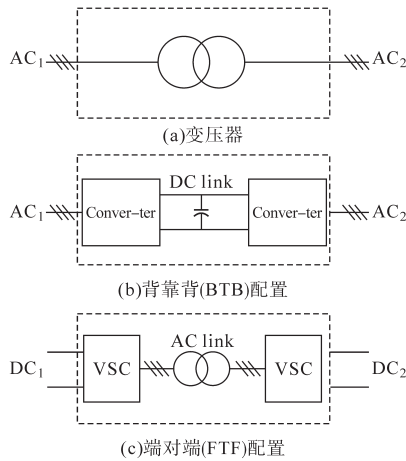


图1 不同的互连结构

Fig. 1 Different interconnection configurations

文献[5,19-20]中也提出了一些其他用于高压直流互连的电路配置,例如直流自耦变压器(AT)、HVDC潮流控制器(PFC)、高压直流分接头和多端口DC/DC转换器。这些结构实际上可以看作是FTF概念的衍生物。因此,本文的目的是综合FTF概念在高压直流互连中的所有可能的配置和应用,并研究相应的控制策略。对电路结构和FTF结构的控制进行了介绍并对基础的FTF直流/直流转换器进行了模拟。然后分别介绍了FTF衍生拓扑的原理和控制,包括FTF型高压直流自耦变压器、FTF型高压直流潮流控制器和FTF HVDC分接头,并分别进行了仿真验证。最后,讨论了这些FTF型拓扑结构对高压直流互连系统的影响。

1 FTF配置与DC/DC变换器

1.1 电路配置

图2为基于MMC的FTF系统配置。它包含

2个模块多电平变换器(MMC₁和MMC₂),它们通过交流变压器连接。这2个直流终端可以用来连接不同的直流系统。每个MMC有6个桥臂(形成3个支脚),每个桥臂由N_k(k∈{1,2})个子模块(SM)组成。每个SM通常是一个半桥(HB)电路,但如果需要反向直流电压极性,也可以是一个全桥(FB)电路^[18]。SM中使用的半导体是IGBT,并在故障旁路嵌入了机械旁路开关。串联电感L_{ak},在上、下桥臂中提供桥臂、支脚和直流端子之间的电压缓冲;它的变压器漏感指的是二次侧,CSM为每个子模块的电容。

FTF继承了MMC的独特优点,如电压均衡化、模块化、可扩展性、易装配性、低电磁干扰、优良的控制性能、易冗余性和高效率等。FTF合成的直流和交流母线电压波形基本光滑,谐波含量较低,因此不需要滤波器。交流互感器的主要功能是电压匹配和电流隔离。其固有的漏电感可用于控制功率传输。由于交流链路仅在FTF内部(电能质量不受关注),变压器频率可以高于线路频率(如100~250 Hz),以降低变压器成本、重量和尺寸。较高的交流频率允许较小的子模块电容,但交流频率的上限是由变压器磁性材料决定的,以避免产生过多的磁(涡流和磁滞)损耗。

根据模块化多电平变换器的工作原理。MMC_k的j相电压方程为

$$u_{ojk} = \frac{u_{lyk} - u_{wyk}}{2} - \frac{L_{ak}}{2} \frac{di_{ojk}}{dt} - \frac{R_{ak}}{2} i_{ojk} \quad (1)$$

$$u_{dck} = u_{lyk} + u_{wyk} + 2L_{ak} \frac{di_{cj k}}{dt} + 2R_{ak} i_{cj k} \quad (2)$$

其中
$$i_{cj k} = \frac{i_{wik} + i_{lyk}}{2}$$

式中:u_{ojk}为j相(j∈{A,B,C})的输出交流电压;i_{ojk}为输出交流电流;u_{dck}为直流端电压;i_{dck}为直流电流;u_{wjk},i_{wjk}和u_{lyk},i_{lyk}分别为上臂和下臂的电压和电流;R_{ak}为寄生臂电阻;i_{cjk}为由R_{ak}寄生臂电阻所输出的循环电流。

电流之间的关系导出为

$$i_{ojk} = i_{lyk} - i_{wyk} \quad (3)$$

$$i_{dck} = \sum_{j=A,B,C} i_{cj k} \quad (4)$$

直流电压u_{dck}应在MMC各桥臂的N_k个SM中平均分配,即每一个子模块电容电压u_{cjk}应调整为

$$u_{cjk} = u_{dck} / N_k \quad (5)$$

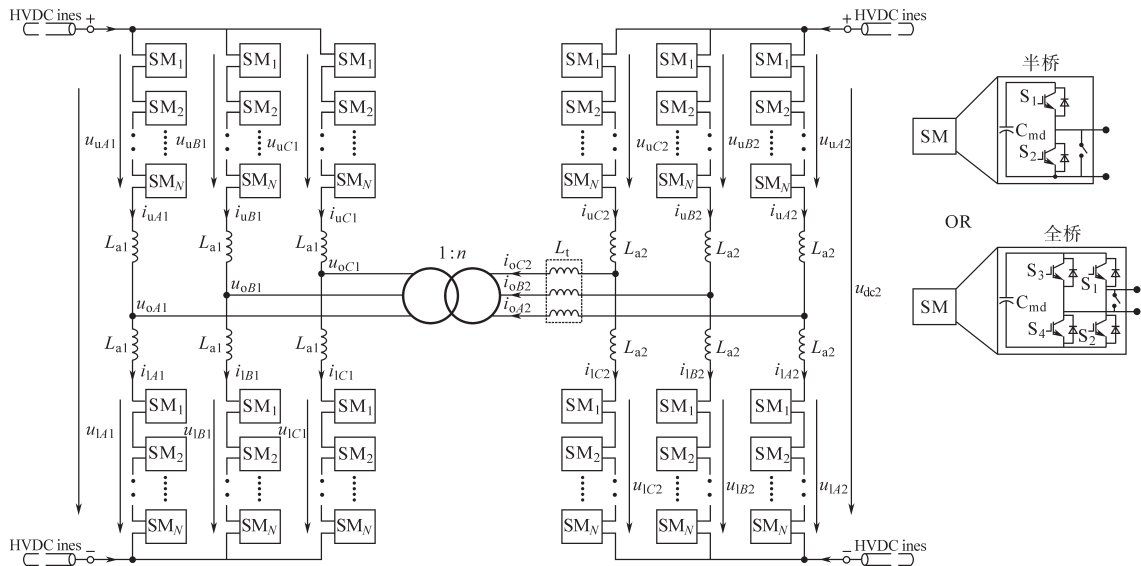


图2 采用MMC的FTF系统的基本电路结构

Fig.2 Basic circuit structure of the FTF system employing modular multilevel converters

1.2 FTF DC/DC 变换器

FTF DC/DC 变换器直接利用直流终端连接不同的直流输电线路。在HVDC的应用中,可以有3种DC/DC配置:单极不对称带地回路,单极对称电路和双极对称电路,如图3所示。注意,双极对称DC/DC转换器实际上是FTF概念的扩展,它包含4个通过交流链路连接的MMC。FTF DC/DC变换器本身就具有直流故障保护能力。当直流极对极短路发生故障时,DC/DC变换器通过断开特定的IGBT,停止从交流线路向直流线路的供电。这样可以防止一个直流系统的故障传播到另一个直流系统^[14]。这是直流输电线路的一个重要特点,特别是在目前还没有可行的高压直流断路器的情况下。

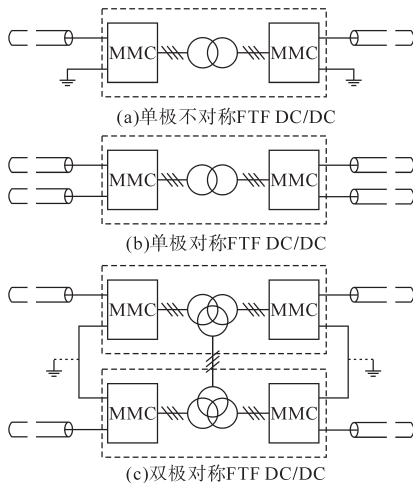


图3 不同FTF DC/DC配置

Fig.3 Different FTF DC/DC configurations

当2个直流系统间的电压差较小时,可能不需要进行电压匹配,进而不需要交流链路变压器。但对于对称高压直流系统,极对地故障会导致正常极电压上升到额定电压的2倍。在这种情况下,交流变压器必须提供电流隔离,以防止一个直流系统的极对地故障通过DC/DC变换器传播到另一个直流系统。

1.3 控制

图4给出了FTF DC/DC变换器稳定运行的控制模块回路。控制回路包括2部分:交流控制回路和直流控制回路。

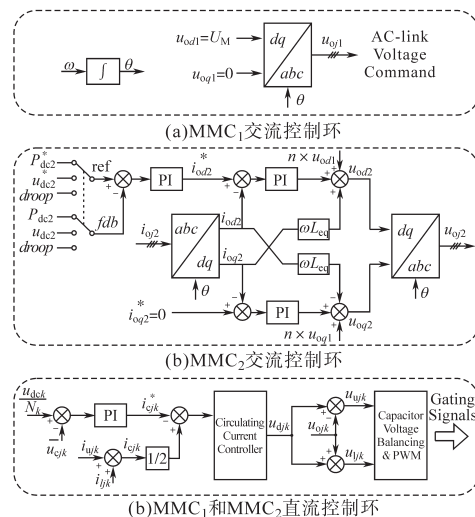


图4 基本FTF DC/DC变换器的控制回路

Fig.4 Control loops of the basic FTF DC/DC converter

1)交流控制回路:如图4a所示,一个模块化多电平变换器被设置为一个固定的交流调制命

令,以建立额定交流链路电压。如图4b所示,另一个模块化多电平变换器(或双极对称结构中的其他模块化多电平变换器)有2个控制回路。外环调节发射功率、直流电压、电压与功率之间的下垂关系。在内部循环中,采用经典的*d-q*电流解耦控制方法,其中 $n \times u_{od1}$ 和 $n \times u_{oq1}$ 为变压器次级交流母线电压的前馈, ω 为交流环节角频率, L_{eq} 为等效电感。

$$L_{eq} = \frac{1}{2} (L_{a1} + L_{a2}) + L_t \quad (7)$$

式中: L_{a1} 为MMC₁的电感; L_{a2} 为MMC₂的电感; L_t 为变压器瞬态电感。

由于交流环节电压是内部的,控制系统不需要交流电压传感,不需要传统的锁相环(PLL),因此,系统的频率和相位角可以直接设定。

2)直流控制回路:FTF DC/DC变换器采用能量平衡控制,保证了各MMC的稳定运行。MMC的直流侧和交流侧之间的任何功率不平衡都会对SM电容器存储的总能量产生不利影响。如图4c所示,每个MMC存储能量的控制是通过调节每相平均SM电容电压 \bar{u}_{Cjk} ,其值为 \bar{u}_{dc1}/N_k 。在内环中加入循环电流控制器以跟踪直流电流命令 i_{dc}^* 并抑制不需要的二阶谐波^[19]。SM电容电压与脉宽调制(PWM)策略的平衡(如最近电平调制和相关排序算法)被用于生成每个SM的最终门控信号。

1.4 模拟案例研究

为了验证该变换器的有效性和控制策略,在Matlab/Simulink环境下对FTF DC/DC变换器进行了仿真,分别连接了±320 kV和±150 kV直流电压的单极对称直流输电系统。MMC₂控制额定功率为300 MW的直流电源,主要电路参数为:额定直流功率 $P_{DC}=300$ MW,MMC₁直流电压 $u_{dc1}=\pm 320$ kV,MMC₂直流电压 $u_{dc2}=\pm 150$ kV,交流变压器频率 $f=150$ Hz,交流变压器电压 u_1/u_2 为350 kV/150 kV,MMC₁每桥臂SM数 $N_1=64$,MMC₂每桥臂SM数 $N_2=30$,MMC₁的SM电容 $C_{SM1}=200$ μF,MMC₂的SM电容 $C_{SM2}=427$ μF,标称SM电容器电压 $U_c=10$ kV,桥臂电感 $L=5$ mH,开关频率 $f_s=800$ Hz。

仿真结果如图5所示,功率最初从MMC₁输送到MMC₂,在0.05~0.1 s之间,功率从+300 MW下降到-300 MW,这意味着功率流发生了逆转。

交流线路电压和电流波形呈正弦,畸变小。桥臂电流平滑,电容器电压保持良好平衡。这证实了所提出控制策略的有效性。

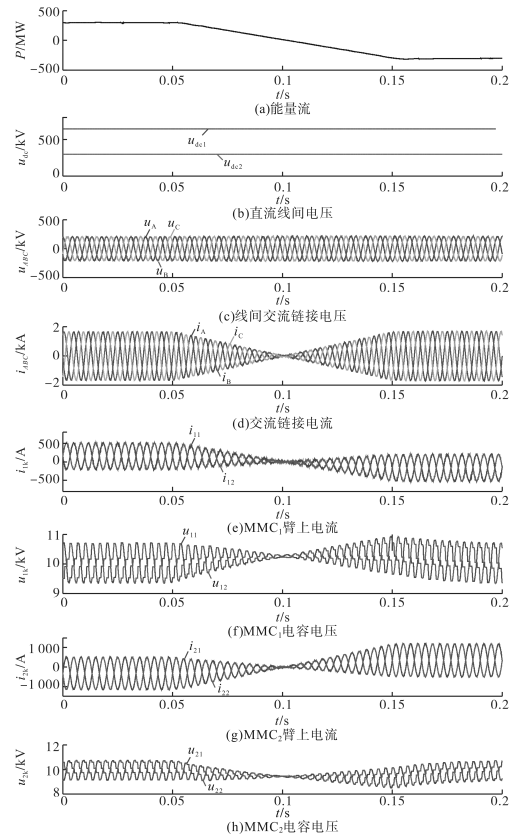


图5 DC/DC变换器的仿真结果

Fig.5 Simulation results of DC/DC converter

2 FTF 高压直流自耦变压器

2.1 电路配置

由于直流系统中的FTF DC/DC变换器类似于交流系统中的交流变压器,在直流系统中也可以找到交流自耦变压器(AT)^[21-23]类比。如图6所示,直流自耦变压器也是FTF结构,但具有在2个直流端子之间共用的1条母线。在FTF DC/DC变换器中,所有功率都通过交流链路的2个功率阶段传导。而在FTF直流自耦变压器中,部分功率可以直接通过传导过程,只有一小部分通过交流链路传输。特别是当电压比 u_{dc1}/u_{dc2} 很小时。因此,变压器所需的SM数量和功率额定值都可以降低,这意味FTF直流自耦变压器比FTF DC变换器更轻、更便宜、更高效。

但直流自耦变压器不提供2个直流终端间的电气隔离。任何在直流侧的不良情况都会影响到另一侧的设备。特别是在直流短路故障情况下,需要附加全桥和半桥SM或使用高压直流断

路器来阻止故障电压。这些新增的SM或断路器将大大增加成本和直流自耦变压器的损耗。因此,考虑效率和不可靠性的优劣,直流自耦变压器应该更适合于将2个电压差小的直流系统连接起来,不需要提供直流故障保护,否则FTF DC/DC变换器可能更可靠、更经济。

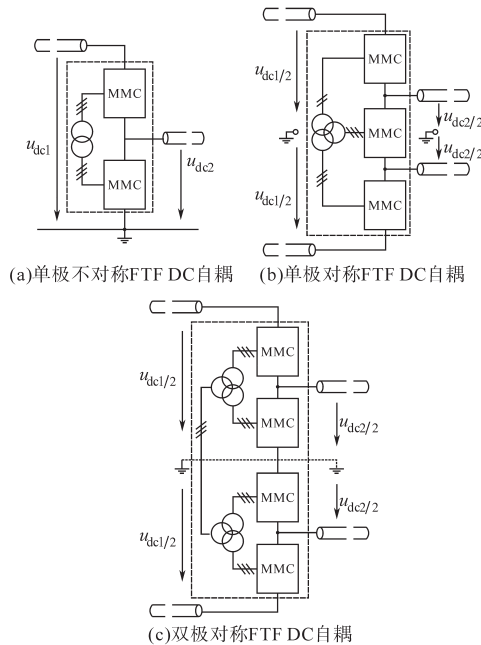


图6 不同FTF直流自耦配置

Fig.6 DC auto-coupling configurations with different FTF

2.2 控制

由于直流自耦变压器是由FTF DC/DC变换器派生的,因此图4所示控制方案,也适用于直流自耦变压器。然而,图4中的控制器只通过交流链路调节功率,而在直流自耦变压器中也有通过直接传导的能量转移。实际上,这部分功率是由直流回路能量平衡控制器自动调节的,通过维护每个MMC的功率平衡来实现。由于控制方案已在前面的部分进行了测试,因此对直流自耦变压器的仿真不再重复。

3 FTF 高压直流潮流控制器

3.1 电路配置

未来,如果多条直流输电线路接入电网,则所有直流输电线路的潮流都是可控的。但每个高压直流变换器只能控制自己的终端电压,因而缺乏独立控制所有线路潮流的能力^[24]。因此,通过某些线路的功率是不受控制的,只取决于线路阻抗。这将导致一些线路超载,而其他线路的使用不足。

为了解决这一问题,需要在交流系统中利用FACTS的知识^[25]。可以在线路中增加直流潮流控制器(PFC),以提高功率控制自由度。但与交流输电不同的是,直流输电不受大电感和线路电阻的阻碍,因此,较小的直流电压变化会产生明显的直流电流变化。所以,直流潮流控制器只需要额定电压的一小部分(2%~3%)和额定功率的高压直流转换器。本文提出了一种基于功率变换器的直流潮流控制器^[26-27],但这些转换器必须连接到同一个交流电网,增加了成本和复杂性。为了避免交流网络,已提出了图7所示的FTF高压直流潮流控制器^[28-29],这种FTF PFC是FTF DC/DC转换器的变体,它将终端与直流线路串联在一起后,通过FTF PFC在2条线路之间重新进行潮流分配。

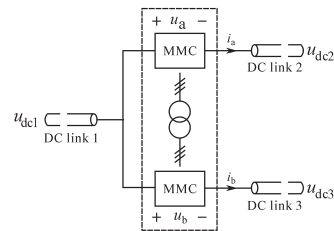


图7 FTF HVDC PFC将3条直流线路连接在1个网状直流电网中

Fig.7 FTF HVDC PFC connecting three DC lines in a meshed DC grid

图7中, u_a 和 u_b 变化范围较大,用来调节功率流。在这种情况下,应该采用带全桥SM的MMC,因为全桥SM的MMC的直流端电压可以从0调到满电压,同时保持恒定的交流链路电压。由于这2条直流线路之间不需绝缘,在某些情况下,FTF PFC的交流链路变压器可能会被移除,但需要采用额外的零序循环电流抑制控制。

3.2 控制

由于FTF PFC与直流输电线路串联,其控制方案不同于以往的FTF DC/DC变换器,文献[30]提出了一种FTF PFC控制方法,其功率流不受PFC本身的控制,而是依赖于系统电压 u_{dc1} 的调节,这不是最优的。如图8所示,本文提出了一种改进的FTF PFC控制方案。PFC目的为管理2条线路之间的潮流分配,因此只需要控制1条线路上的潮流,并且可以通过 u_a 来调节,如图8a所示。图8c所示为MMC₁的储能控制,通过交流链路调节功率来保持功率平衡。另一方面,MMC₂将交流链路电压建立为图8d所示的交流控制环。其

功率平衡是通过调整直流终端电压 u_b 来维持的,如图8b所示。 \bar{u}_{c1} 和 \bar{u}_{c2} 分别代表MMC₁和MMC₂的平均SM电容电压。最后,利用图8e中的相能量平衡和循环电流控制回路,将储能分配到三相之间,抑制内部循环电流。因此,潮流完全可以由PFC控制。

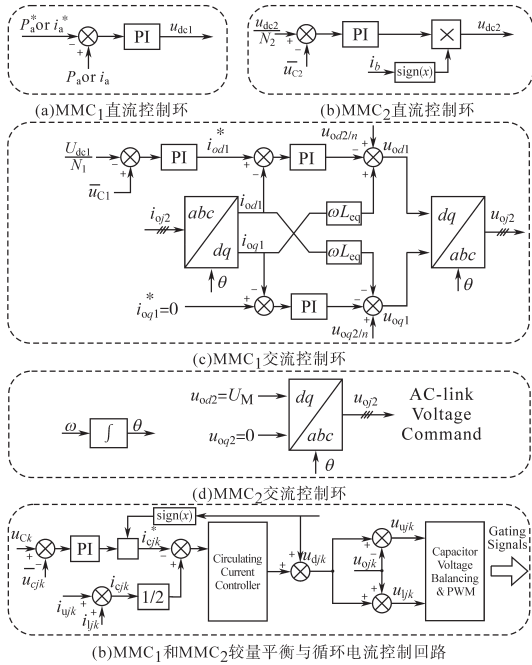


图8 改进的FTF PFC的控制回路
Fig. 8 Control loops of the FTF PFC improved

3.3 模拟案例研究

在 Matlab/Simulink 环境下,对由 FTF PFC 互连的3个直流系统进行了仿真,验证了其有效性和控制策略。在此仿真情况下,直流系统1是运行在恒功率模式下的风电场。当直流系统2和直流系统3处于恒定电压模式时,电压分别固定在320 kV和315 kV。直流线路2、直流线路3均为200 km, $R=20 \text{ m}\Omega/\text{km}$, $L=1.0 \text{ mH}/\text{km}$ 。FTF PFC有2个模块化多电平变换器,每个臂有10个全桥子模块,以及1个1:1的交流链路变压器。电路参数为:系统1额定功率 $P_{dc1}=600 \text{ MW}$;系统2直流电压 $u_{dc2}=320 \text{ kV}$;系统3直流电压 $u_{dc3}=315 \text{ kV}$;直流线路2、直流线路3电阻 $R_{line}=4 \Omega$;直流线路2、直流线路3电感 $L_{line}=200 \text{ mH}$;交流变压器频率 $f=150 \text{ Hz}$;交流变压器电压 $u_1/u_2=7.5 \text{ kV}/7.5 \text{ kV}$;每桥臂SM数量 $N_1=N_2=10$;SM电容 $C_{SM1}=C_{SM2}=6000 \mu\text{F}$;标称SM电容电压 $U_c=1 \text{ kV}$;桥臂电感 $L=5 \text{ mH}$;开关频率 $f_c=900 \text{ Hz}$ 。PFC的控制命令是保持从系统1到系统3的200 MW恒定功率流。

图9是系统1产生的功率最初为600 MW,在

0.1~0.2 s之间下降到300 MW时的仿真结果。从图9可以看出,通过调整插入电压,PFC在整个过程中调节系统3的恒定功率流(200 MW)。这说明了功率流通过PFC的可控性。MMC电容电压稳定,交流环节电压、电流和桥臂电流平稳且调节良好。这些波形证实了所提出的控制方案的有效性。

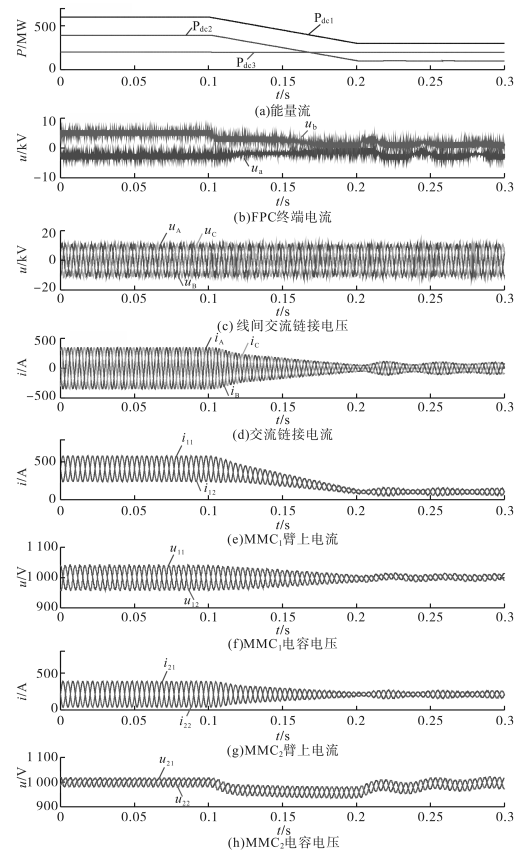


图9 FTF PFC的仿真结果
Fig.9 Simulation results of FTF PFC

4 FTF HVDC 分接头

4.1 电路配置

长期以来,从高压直流输电电路上汲取少量电力,被认为是向偏远社区或工业区提供经济电力的方式^[31]。与采用变压器降压的交流输电相比,高压直流输电必须使用变频器来降低直流电压。若本地电网是直流微电网,则HVDC分接头实际是DC/DC变换器,它可以有2种电路配置:并联和串联(都是FTF结构),如图10所示。虽然并联电源分接头不假定直流环节电流流向,对直流电压调节影响最小,但在成本和可靠性方面,串联配置优于并联。由于串联电源分接头没有必要在高压直流电压分接头限制之下,因此,此故障不会导致整个高压直流系统的故障。到目前为止,只讨论了分路FTF分接头,没有讨论系列FTF

T分接头。因此,本节的目的是填补这一空白。

在串联FTF高压直流分接头中,一个MMC插入高压直流线路,另一个插入本地中压(MV)直流电网。中压侧MMC采用半桥SM。在高压侧使用全桥SM保持恒定的交流链路电压,而其直流电压可以在很宽的范围内进行调整。在本系列分接头中,交流环节变压器必须提供电流隔离,并承担直流电压偏移。

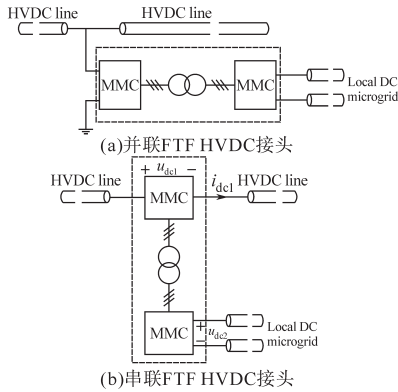


图10 不同的FTF高压直流分接头配置

Fig.10 HVDC tap configurations with different FTF

4.2 控制

图11给出了系列FTF HVDC分接头的控制方案。MMC₁(高压侧)建立交流链路电压(图11c)并通过调整直流端电压来维持功率平衡(图11a)。MMC₂(中压侧)调节恒定的直流电压(图11b)并通过调整交流链路吸收的功率来维持其功率平衡(图11d)。也采用能量平衡和循环电流控制回路。

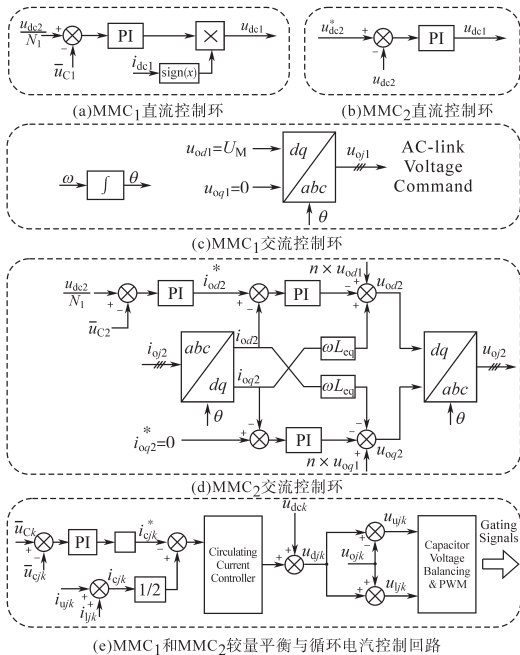


图11 系列FTF HV DC分接头的控制方案

Fig.11 Control scheme of the series FTF HVDC tap

4.3 模拟案例研究

利用 Matlab/Simulink 仿真软件,对采用±320 kV 直流系统 3 MW 功率的 FTF HVDC 串联分接头及其控制方案的有效性进行了评估,给出了±15 kV 直流侧电网的供电方式。仿真参数为:功率接头 $P=3\text{ MW}$;额定 HVDC 线路电流 $i_{dc}=940\text{ A}$;交流变压器频率 $f=150\text{ Hz}$;交流变压器电压 $u_1/u_2=6\text{ kV}/15\text{ kV}$;MMC₁ 每桥臂全桥 SM 数量 $N_1=10$;MMC₂ 每桥臂半桥 SM 数量 $N_2=30$;MMC₁ SM 电容 $C_{SM1}=6\text{ mF}$;MMC₂ SM 电容 $C_{SM2}=1\text{ mF}$;标称 SM 电容电压 $U_c=1\text{ kV}$;桥臂电感 $L=2\text{ mH}$;开关频率 $f_c=900\text{ Hz}$ 。

HVDC 输电线路最初的功率为 600 MW (线电流 935 A),在 0.1~0.2 s 之间,功率降至 400 MW(线电流 620 A)。仿真结果如图 12 所示,FTF HVDC 分接头保证恒功率(恒流 100 A)向±15 kV 本地直流网络传输,具有稳定的 MMC 波形。

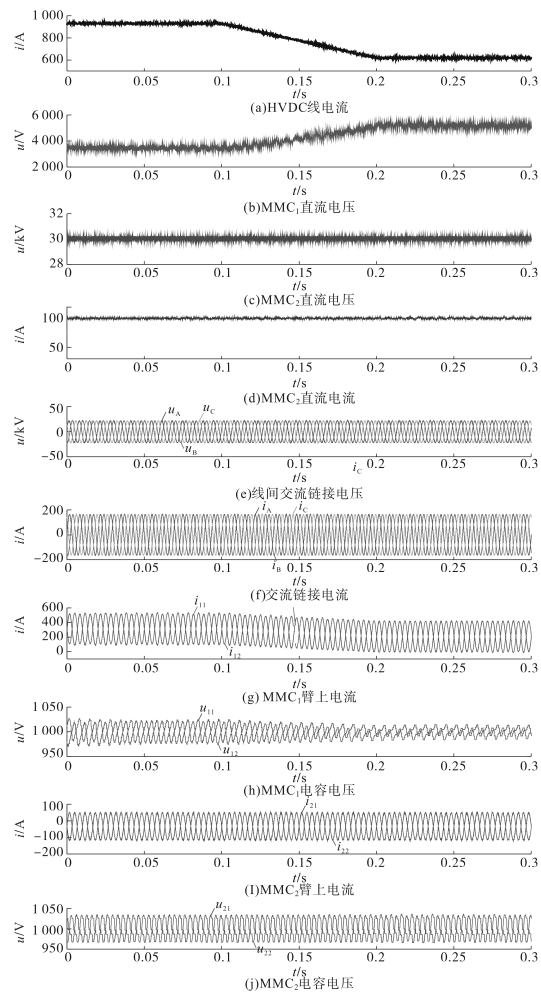


图12 FTF 系列高压直流分接头仿真结果

Fig.12 Simulation results of the FTF series HVDC tap

5 结论

电力电子技术正日益渗透到电力系统中。在未来的高压直流电网中,由于没有直流磁性变压器,这一技术的应用将更加不可缺少。而直流互联设备则是以电力电子技术为基础的。因此,本文在FTF结构的基础上,综述了一种有前景的直流互联拓扑,包括DC/DC变换器、DC AT, DC PFC和DC分接头。讨论了各拓扑结构的工作原理和控制方案,仿真结果验证了其有效性。

应当指出,本文只是一份初步研究报告,需要进一步研究以解决具体问题和实际挑战,例如:

1)所有考虑的FTF拓扑都可以是多端口^[32-34],通过将多个MMC并联到一个公共交流链路,来连接多个HVDC网络;

2)通过使用方波(或梯形波)交流链路^[35-36],可以进一步降低这些FTF拓扑的尺寸、重量和成本。但以变压器钢硅中较高的磁损耗为代价;

3)在直流AT,DC PFC和DC分接头中,交流线路变压器需要承受高绝缘应力和较大的直流电压偏移,这给工程带来了困难;

4)这些FTF拓扑的成本降低、效率提高和故障保护是面临的重要挑战。

因此,要使这些FTF拓扑在技术上和经济上更好地连接未来的高压直流电网,仍有许多重要的工作要做。

参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 姚良忠, 吴倩, 王志兵, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [3] 安婷, Andersen B, MacLeod N, 等. 中欧高压直流电网技术论坛综述[J]. 电网技术, 2014, 41(8): 2407-2416.
- [4] Davidson C C, Guillaume de Preville. The Future of High Power Electronics in Transmission and Distribution Power Systems[C]//13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009.
- [5] Bahrman M P, Johnson B K. The ABCs of HVDC Transmission Technologies[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(2): 32-44.
- [6] Wu B. High Power Converters and AC Drives[M]. NJ: Wiley-IEEE Press, 2006.
- [7] Vijay K Sood. HVDV and FACTS Controller: Applications of Static Converters in Power Systems[M]. Springer-verlag, 2004.
- [8] Lesnicar A, Marquardt R. An Innovative Modular Multilevel Converter Topology Suitable for a Wide Power Range [C]// IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, 2003.
- [9] Dorn J, Gambach H, Strauss J, *et al.* Trans Bay Cable—A Breakthrough of VSC Multilevel Converters in HVDC Transmission [C]//San Francisco Colloquium, 2012.
- [10] Saeedifard M, Irvani R. Dynamic Performance of a Modular Multilevel Back-to-back HVDC System[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2903-2912.
- [11] Tang G, He Z, Pang H, *et al.* Basic Topology and Key Devices of the Five-terminal DC Grid [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2): 22-35.
- [12] Chaudhuri N R, Chaudhuri B, Majumder R, *et al.* Multi-terminal Direct-current Grids: Modeling, Analysis, and Control [M]. IEEE Wiley, 2014.
- [13] Wang Y, Marquardt R. Future HVDC-grids Employing Modular Multilevel Converters and Hybrid DC-breakers[C]//15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2013.
- [14] Barker C D, Davidson C C, Trainer D R, *et al.* Requirements of DC-DC Converters to Facilitate Large DC Grids[C]// 44th International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 2012: 1-10.
- [15] Oates C. A Methodology for Developing 'Chainlink' Converters [C]//13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009: 1-10.
- [16] Kenzelmann S, Rufer A, Dujic D, *et al.* Isolated DC/DC Structure Based on Modular Multilevel Converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 89-98.
- [17] Luth T, Merlin M M C, Green T C, *et al.* High-frequency Operation of a DC/AC/DC System for HVDC Applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4107-4115.
- [18] Perez M A, Bernet S, Rodriguez J, *et al.* Circuit Topologies, Modeling, Control Schemes, and Applications of Modular Multilevel Converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 4-17.
- [19] Debnath S, Qin J, Bahrani B, *et al.* Operation, Control, and Applications of the Modular Multilevel Converter: a Review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 37-53.
- [20] Sasongko F, Sekiguchi K, Oguma K, *et al.* Theory and Experiment on an Optimal Carrier Frequency of a Modular Multilevel Cascade Converter with Phase-shifted PWM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3456-3471.
- [21] Schon A, Bakran M M. A New HVDC-DC Converter for the Efficient Connection of HVDC Networks[C]// Proceedings of PCIM Europe Conference, 2013: 525-532.
- [22] Schon A, Bakran M M. Comparison of the Most Efficient DC-DC Converters for Power Conversion in HVDC Grids [C]// Proceedings of PCIM Europe Conference, 2015: 518-526.

[23] Schon A, Bakran M M. A New HVDC-DC Converter with Inherent Fault Clearing Capability[C]//15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2013: 1-10.

[24] Veilleux E, Ooi B. Power Flow Analysis in Multi-terminal HVDC Grid [C]//IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition,2011.

[25] Hingorani N G, Gyugyi L. Understanding Facts: Concept and Technology of Flexible AC Transmission Systems [M]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press,2000.

[26] Veilleux E, Ooi B. Multi-terminal HVDC with Thyristor Power-flow Controller[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2012,27(3):1205-1212.

[27] Kim S, Cui S, Sul S. Modular Multilevel Converter Based on Full Bridge Cells for Multi-terminal DC Transmission[C]//16th European Conference on Power Electronics and Applications,2014:1-10.

[28] Zhang X, Chen J, Ma Y, *et al.* Bandwidth Expansion Method for Circulating Current Control in Parallel Three-phase PWM Converter Connection System [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014,29(12): 6847-6856.

[29] Li B, Shi S, Xu D, *et al.* Control and Analysis of the Modular Multilevel DC De-icer with STATCOM Functionality [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63 (9) : 5465-5476.

[30] Ranjram M, Lehn P W. A Multiport Power Flow Controller for DC Transmission Grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016,31(1):389-396.

[31] Bahram M, Baker M, Bowles J, *et al.* Integration of Small Taps Into Existing HVDC Links [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995,10(3):1699-1706.

[32] Luth T, Merlin M M C, Green T C. Modular Multilevel DC/DC Converter Architectures for HVDC Taps[C]//16th European Conference on Power Electronics and Applications, 2014: 1-10.

[33] Lin W, Wen J, Cheng S. Multiport DC-DC Autotransformer for Interconnecting Multiple High-voltage DC Systems at Low Cost[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12):6648-6660.

[34] Gowaid I A, Adam G P, Massoud A M, *et al.* Quasi Two-level Operation of Modular Multilevel Converter for Use in a High-power DC Transformer with DC Fault Isolation Capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (1):108-123.

[35] Xing Z, Ruan X, You H, *et al.* Soft-switching Operation of Isolated Modular DC/DC Converters for Application in HVDC Grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016,31(4):2753-2766.

[36] Gowaid I A, Adam G P, Ahmed S, *et al.* Analysis and Design of a Modular Multilevel Converter with Trapezoidal Modulation for Medium and High Voltage DC-DC Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5439-5457.

收稿日期:2018-03-15

修改稿日期:2018-04-13

(上接第105页)

[5] 李继胜,赵学风,杨景刚,等. GIS典型缺陷局部放电测量与分析[J].高电压技术,2009,35(10):2440-2445.

[6] 陶诗洋,冯义,张天辰,等. 基于脉冲电流法的高压开关柜局部放电在线监测装置[J].电力系统保护与控制,2019,47(9):145-149.

[7] 张利,屈斌,王永宁,等. GIS壳体振动机理和局部放电优化诊断与应用[J/OL].中国电力,2020[2020-04-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200403.1208.012.html>.

[8] 李月英,林家泉,李宗帅. 基于频率约束的经验模态分解的谐波检测方法[J].电气传动,2015,45(8):72-76.

[9] 李金,张喜铭,时伯年,等. 一种基于瞬时无功功率理论的改进谐波检测算法[J].电气传动,2020,50(3):92-96,106.

[10] 崔芮华,胡文达,耿丽恺. 基于小波重构信号奇异点的航空故障电弧检测[J].电气传动,2018,48(6):69-72.

[11] 陈石,张兴敢. 基于小波包能量熵和随机森林的级联H桥多电平逆变器故障诊断[J].南京大学学报(自然科学),2020,56(2):284-289.

[12] 张锦,唐友亮,张贞艳,等. 两电机系统模糊PID支持向量机逆控制[J].电气传动,2018,48(12):59-62.

[13] Liu B W, Ma H Z, Ju P, *et al.* Partial Discharge Diagnosis by Simultaneous Observation of Discharge Pulses and Vibration Signal[J].IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(1):288-295.

[14] Wang C N, Liu B W, Xu H H, *et al.* Novel Method for Partial Discharge Detection in Gas Insulated Substation[C]//IEEE 2016 China international Conference on Electricity Distribution,2016:10-13.

[15] 王伟,李兴华,陈作彬,等. 基于小波包变换的爆破振动信号能量熵特征分析[J].爆破器材,2019,48(6):19-23.

[16] 李强,车文龙. 基于改进粒子群优化神经网络的电机故障诊断[J].电气传动,2020,50(1):103-108.

[17] 郭立全,王克明. 基于小波包能量谱的航空发动机故障特征提取方法[J].沈阳航空航天大学学报,2014,31(1):12-15.

[18] 郭庆,何劫恺,苏海涛,等. 基于心理声学及支持向量机的扬声器异常音检测算法[J].华东大学学报(自然科学版),2020,46(2):275-281.

收稿日期:2020-04-18

修改稿日期:2020-05-08