

直流-直流自耦变压器

林卫星, 文劲宇, 程时杰

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

DC-DC Autotransformer

LIN Weixing, WEN Jinyu, CHENG Shijie

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: This paper proposes a dc-dc autotransformer for connecting two dc grids with different dc voltage levels. The dc-dc autotransformer is able to make use of the already existed dc voltage of the dc grid with lower voltage. Compared with conventional dc/dc converter employing full power dc/ac/dc conversion, the dc-dc autotransformer is able to reduce the total used converters to about half of a conventional dc/dc converter. Typical topologies of the dc-dc autotransformer are proposed in this paper. The ways of designing the voltage and power rating of the converters in the dc-dc autotransformer are mathematically deduced. Controllers for the dc-dc autotransformer are designed. Simulations in PSCAD/EMTDC validate the feasibility and benefits of the dc-dc autotransformer.

KEY WORDS: dc grid; auto transformer; dc-dc converter; dc-dc autotransformer; high voltage direct current (HVDC)

摘要: 该文提出了一种直流-直流自耦变压器的拓扑, 用于互联两个电压等级不同的高压直流系统。常规的隔离型直流-直流变换器一般需要经过直流-交流-直流两级交/直变换, 两个互联的直流系统之间没有直接的电气连接, 而直流自耦变压器所互联的两个直流系统之间有直接的电气连接, 只有部分互联功率需要经过两级交流/直流变换。为此, 直流自耦变压器所使用的换流器总容量低于常规直流-交流-直流变换技术。该文详细介绍了直流自耦变压器的拓扑, 推导了直流自耦变压器中每个换流器的额定直流电压和额定功率的设计方法, 设计了直流自耦变压器的控制策略, 在PSCAD/EMTDC下仿真验证了直流自耦变压器的可行性。研究结果表明, 所提出的直流自耦变技术能显著降低所使用的换流器容量, 并降低运行损耗。

关键词: 直流电网; 自耦变压器; 直流-直流变换器; 直流自耦变压器; 直流输电

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377067)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51377067).

0 引言

随着传统能源的短缺和环境恶化问题的不断加剧, 风电和太阳能发电等新能源的开发在世界范围内已经获得长足的发展^[1-4]。由于新能源固有的间歇性和随机性特点, 传统的交流电网在接纳大规模可再生能源方面面临诸多技术瓶颈, 柔性多端直流输电、直流电网以及直流微网是解决新能源接入问题的有效技术手段之一^[1-8]。

由于目前直流电网尚无统一标准, 现有的许多直流线路都运行在不同电压等级, 若要将这些已有直流线路互联构成直流电网, 需要应用直流变压器^[1-2]。基于电压源型换流器的直流输电系统(voltage source converter-high voltage direct current, VSC-HVDC)的直流电压等级通常低于基于相控换流器的直流输电系统(line-commutated converter-high voltage direct current, LCC-HVDC), 若要在直流侧互联VSC-HVDC以及LCC-HVDC以构成多端直流输电系统也需要用到直流变压器。随着技术的发展, 未来安装的VSC-HVDC额定直流电压将高于现有运行的VSC-HVDC额定直流电压, 若要在未来将新建设的VSC-HVDC与已运行的VSC-HVDC互联以构成直流电网, 也需要直流变压器。在直流微网以及直流配电网中, 各种可再生能源发电装置、储能装置输出的直流电压不尽相同, 直流变压器也是一个必不可少的部件^[3-4]。

直流变压器(dc-dc, 通常称为直流-直流变换器)可分为斩波型^[6]、变压器隔离型^[9-14]以及谐振型^[15-18]三种技术^[19]。斩波型dc-dc损耗高, 且应用于高压直流输电领域需要将数百个IGBT直接串联。目前, 只有ABB公司有成熟的串联IGBT动态均压技

术^[20]，可以预见斩波型 dc-dc 并不适用于直流输电领域。

文献[9-14]研究了变压器隔离型直流变压器。其基本原理为建设两个电压源型换流器(通常采用模块化多电平换流器拓扑)，两个电压源型换流器的直流端分别与待互联的两个直流电网相连接，两个电压源型换流器的交流端通过交流变压器互联在一起。两直流电网间传输的功率将先经过一个换流器，经直流/交流变换逆变为交流电，该交流电经交流变压器传输至另一个换流器的交流端，再由另一个换流器经交流/直流变换整流为直流电。由此可知，变压器隔离型 dc-dc 中所有传输的直流功率都要经过两级交流/直流变换，变压器隔离型 dc-dc 所使用换流器总容量为额定传输直流功率的 2 倍。为了降低变压器以及模块化多电平换流器的体积和重量，变压器隔离型 dc-dc 的内部交流链路一般运行于中频频率(200~500 Hz)。

文献[15-18]研究了谐振型直流-直流变换器。其技术要点也为建设两个换流器(LCC 换流器或 VSC 换流器)，每个换流器的直流端分别与待互联的直流电网连接，交流端则经由电感-电容-电感(LCL)电路互联在一起。通过 LCL 电路匹配各换流器不同的交流电压输出。与变压器隔离型 dc-dc 类似，谐振型直流-直流变换器中所使用的换流器总容量也为额定直流功率的 2 倍，所使用的换流器总容量大。由于全部输送的功率都要进行两级交流/直流变换，这两类 dc-dc 运行损耗高。

为了改进现有直流-直流变换器的缺陷，降低成本，降低运行损耗，本文提出了一种直流-直流自耦变压器的拓扑。

1 直流自耦变压器拓扑及额定参数设计

1.1 直流自耦变拓扑

本文提出的直流-直流自耦变压器拓扑如图 1 所示，该直流自耦变压器用于连接两个电压等级不同的直流系统 GRID1 和 GRID2。两个直流系统的额定正极-负极电压分别为 E_1 和 E_2 。为分析方便，本文记 $E_1 < E_2$ 。直流自耦变压器主要由 3 个电压源型换流器 VSC1、VSC2 和 VSC3 依次串联而成，其中 VSC2 的直流端口与 GRID1 的直流端口并联连接，VSC1 的直流正端和 VSC3 的直流负端分别与 GRID2 的直流正端和直流负端相连接。

3 个 VSC 换流器的交流侧经过一定的变压器/相电抗电路连接至交流公共母线 B_1 。由于 VSC1 和

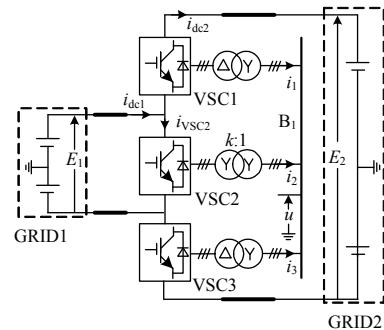


图 1 直流自耦变压器拓扑

Fig. 1 Topology of dc autotransformer

VSC3 采用非对称结构(直流中性点不接地)。为了消除 VSC1 和 VSC3 的中性点偏移，VSC1 和 VSC3 的变压器采用 Y/Δ接线方式。与常规 LCC 类似，变压器靠近变频器侧采用Δ接线方式。

根据应用的需要，当交流公共母线的电压取值与 VSC2 的额定电压一致时，与 VSC2 相连接的变压器可以由相电抗取代，从而节省所使用的变压器数量。

由于直流-直流自耦变压器主要应用于高压直流输电领域，为降低电压源型换流器实现的技术难度，并降低电压源型换流器的损耗，直流自耦变中的每个电压源型换流器采用图 2 所示的模块化多电平换流器拓扑。

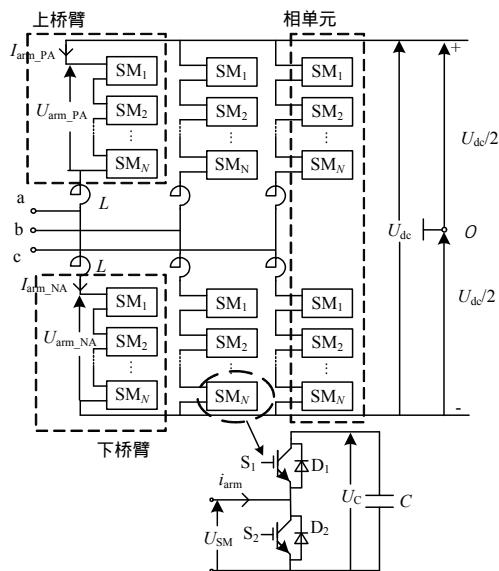


图 2 模块化多电平换流器拓扑

Fig. 2 Topology of modular multilevel converter

图 3 为常规直流-直流变换器的基本拓扑^[9]。该常规直流-直流变换器采用 DC/AC/DC 变换技术。以 E_1 向 E_2 传输功率为例，所传输的功率需先经 VSC1 将直流电逆变为交流电，而后通过交流链路传输到 VSC2 交流端，再经 VSC2 整流为直流电。为此，常规的直流-直流变换技术中，所有传输的

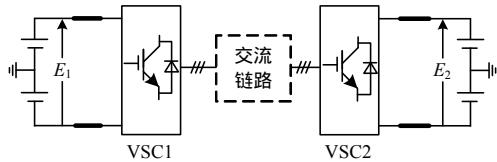


图3 常规隔离型直流-直流变换器拓扑

Fig. 3 Topology of conventional isolated dc-dc converter
有功功率都需要经过两级交/直变换。

对比图1和图3可知，图1所示的技术与图3所示技术类似，都用于独立地连接两个直流电网，两项技术的内部交流系统均为独立交流系统，与外部交流电网没有互联，为此图1和图3技术都属于直流-直流变压器技术。由于图1所示技术的高、低压直流电网之间有直接的电气互联，类似交流自耦变压器中，交流自耦变压器的原副边有直接电的联系，其低压线圈就是高压线圈的一部分，本文将图1所示拓扑命名为“直流-直流自耦变压器”。

1.2 各VSC换流器绝缘设计考虑

对于图1所示的直流自耦变，由于GRID1在VSC2的直流侧为VSC2提供了零电位点，VSC2及其对应的交流链路绝缘可按GRID1的电压等级设计。图1中VSC1及VSC3与高压直流电网有互联，其绝缘需按GRID2的电压等级设计。

由于图3所示常规的直流-交流-直流变换技术中，VSC2与高压直流电网相连接，VSC2的绝缘也应按GRID2的电压等级设计，为此直流自耦变的拓扑并不会因为换流器的串联而额外增加绝缘设备投资。

1.3 直流自耦变压器功率流向分析

记GRID1向GRID2传输的有功功率为P。忽略损耗，可计算得GRID1、GRID2的直流电流为

$$i_{dc1} = P / E_1 \quad (1)$$

$$i_{dc2} = P / E_2 \quad (2)$$

流经VSC2的直流电流为

$$i_{VSC2} = i_{dc1} - i_{dc2} = \left(\frac{P}{E_1} - \frac{P}{E_2} \right) \quad (3)$$

忽略直流线路上的电压损耗，VSC2的直流电压与E₂相等，VSC1、VSC3的直流电压均为(E₂-E₁)/2。

由式(3)及VSC2的直流电压，可知流经VSC2的直流功率为

$$P_{dc2} = E_1 i_{VSC2} = P \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \right) \quad (4)$$

式(4)为VSC2逆变的功率，即由VSC2的直流

侧传向VSC2的交流侧。同理，可求得流经VSC1、VSC3的整流功率为

$$P_{dc1} = P_{dc3} = \frac{E_2 - E_1}{2} i_{dc2} = \frac{P}{2} \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \right) \quad (5)$$

式(5)表明，VSC1、VSC3传输的功率为VSC2传输功率的一半。

由于VSC1—VSC3的交流功率在交流公共母线B₁处汇集，输入交流母线的功率与输出交流母线的功率相等。为此，VSC1、VSC3传输的功率也可以通过功率守恒定律求得。VSC2逆变的功率与VSC1、VSC3的整流功率相等，为此，VSC1、VSC3传输的功率为VSC2传输功率的一半。

由于GRID1和GRID2之间有直接的电气连接，通过直接电气连接传输的有功功率为

$$P_{dir} = E_1 i_{dc2} = P \frac{E_1}{E_2} \quad (6)$$

此处直接电气传输是指E₁的直流电压与VSC1(VSC3)的直流电流构成的功率传输通道。

1.4 直流自耦变压器额定电压、额定功率设计

由图1所示拓扑可知，VSC2的额定直流电压可取为与GRID1的额定直流电压相同，为E₁。而VSC1和VSC3等效地分担GRID2和GRID1之间的电压差值，其额定直流电压为(E₂-E₁)/2。

设两互联电网之间传输的功率为P_N，则根据式(4)、(5)可得VSC2的额定功率可设计为P_N(1-E₁/E₂)，VSC1及VSC3的额定功率都取为P_N/2(1-E₁/E₂)。

可进一步求得3个VSC的总功率为

$$P_{cN} = 2 \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \right) P_N \quad (7)$$

1.5 直流自耦变压器与常规技术的对比

对比图1和图3可知，两者的区别主要有：

1) 常规直流-直流变换器中，GRID1和GRID2之间没有直接的电气联系，而是通过联接变压器的磁耦合联系在一起，而直流自耦变压器中GRID1和GRID2之间有直接的电气联系；

2) 常规直流-直流变换器所使用的换流器总容量为2P_N，而直流自耦变压器使用的换流器总容量为2P_N(1-E₁/E₂)，E₁与E₂越接近，直流自耦变压器所采用的换流器容量越小。以互联±320 kV和±640 kV直流电网为例，直流自耦变压器所使用的换流器总量为常规技术的一半；而互联±320 kV和±400 kV直流电网时，直流自耦变压器所使用的换

流器容量仅为常规技术的 20%。

2 直流自耦变压器的控制

2.1 公共母线交流电压控制

直流自耦变压器中，一部分互联功率通过 GRID1 和 GRID2 之间的直接电气联接进行传输，剩余的功率则需要经过直流-交流-直流两级交/直变换传输。为使直流自耦变压器稳定运行，需要维持交流公共母线交流电压恒定。一种可行的策略是利用 VSC2 控制公共母线交流电压，利用 VSC1 和 VSC3 控制 GRID1 和 GRID2 之间传输的有功功率。

图 1 所示直流自耦变压器中, VSC2 交流支路的方程为

$$\begin{cases} M_{2d} \frac{E_1}{2} k_2 = U_{cd2} = (R_2 + L_2 \frac{d}{dt}) I_{2d} - \omega_o L_2 I_{2q} + U_d \\ M_{2q} \frac{E_1}{2} k_2 = U_{cq2} = (R_2 + L_2 \frac{d}{dt}) I_{2q} + \omega_o L_2 I_{2d} + U_q \end{cases} \quad (8)$$

式中： U_d 、 U_q 为交流公共母线电压的 dq 轴分量； U_{cd2} 、 U_{cq2} 为 VSC2 折算到公共母线侧的输出电压； I_{2d} 、 I_{2q} 为 i_2 的 dq 轴分量； k_2 为 VSC2 的变压器变比； M_{2d} 、 M_{2q} 分别为 VSC2 的 dq 轴调制比； ω_0 为公共母线交流电压的电角频率； L_2 为 VSC2 变压器支路折算到交流公共母线侧的漏电感。

由式(8)可知, 稳态时提高 M_{2d} 即可提高 U_d , 提高 M_{2q} 即可提高 U_q 。图 4 给出了公共母线的交流电压控制框图。为了提高 VSC 换流器的安全性, 图 4 还引入了电流控制环。图 4 中, 下标 ref 和 pu 分别代表对应量的参考值和标么值, f 为公共母线交流电压的频率, $f = \omega_0/(2\pi)$ 。VSC2 进行 dq 变换以及形成触发脉冲的参考角 θ 由晶振 VCO 产生。

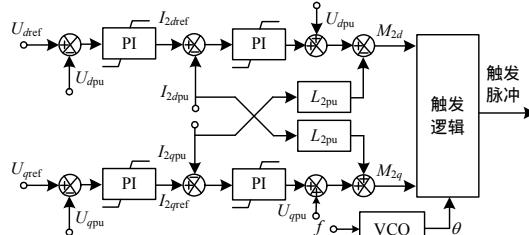


图 4 公共母线交流电压控制框图

Fig. 4 Control diagram of the common bus ac voltage

直流自耦变内部的交流系统为孤立交流系统，其交流链路运行频率的选择较为自由。频率选为工频 50 Hz/60 Hz 时便于使用技术成熟的变压器、电抗器等交流设备。交流链路频率高于工频时(例如 200 Hz~1 kHz)，则可显著减小交流链路的体积和重量，并减小模块化多电平换流器的子模块电容值和桥臂电感大小，但相应地交流变压器的铁心损耗以

及 MMC 的开关损耗会相应增加。为不失一般性，图 4 中交流链路频率以符号 “ f ” 取代，本文仿真验证部分 f 取值为 50Hz。

2.2 直流功率控制

根据图 1 规定的交，直流电流正方向，增大 VSC2 的 d 轴电流 I_{2d} 即可增大 VSC2 的逆变功率从而增大流经 VSC2 的直流电流 i_{VSC2} 。由于正常运行时， E_1 维持在其额定值附近，增大 i_{VSC2} 即可增大 i_{dc1} 从而增大 GRID1 输出的直流功率。类似地，减小 VSC1，VSC3 的 d 轴电流 I_{1d} ， I_{3d} 也可以增大从 GRID1 输出的直流功率。

图 5 为有功功率控制框图, VSC3 也安装了与图 5 相同的有功功率控制器。规定由 GRID1 向 GRID2 传输功率为功率传输正方向。由于 VSC2 已用于控制交流公共母线的电压, 图 5 利用 VSC1 和 VSC3 控制互联电网间传输的直流功率。图 5 包括有功功率外环和交流电流内环两级控制。

图 5 中将 I_{1qref} 设置为 0, 以使得 VSC1 在公共交流母线处的无功功率为 0。图 5 中变量的定义参见式(8)。

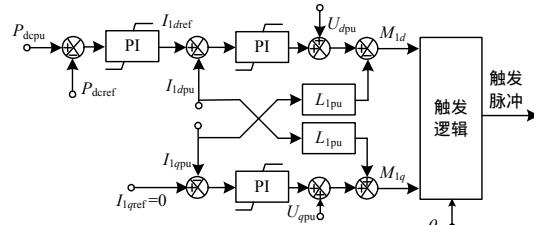


图 5 有功功率控制框图

Fig. 5 Control diagram of dc power

3 直流自耦变压器的扩展技术

3.1 网间联络器

图 6 给出了直流自耦变压器的一个变种技术，用于连接一个交流电网(AC GRID)和两个直流电网(GRID1 和 GRID2)。该拓扑中，AC GRID 和 GRID1 的功率方向相同，即同时向 GRID2 输出功率或同

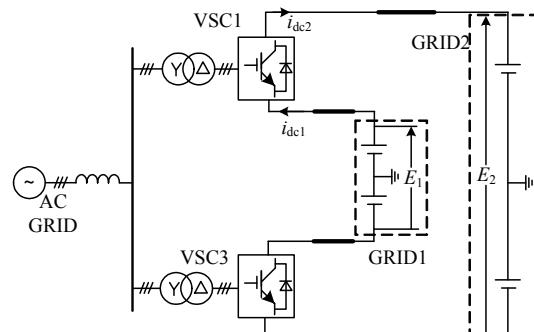


图 6 网间联络器拓扑

Fig. 6 Circuit diagram of auto interconnector

时从 GRID2 吸收功率。

未来的区域电网会存在交/直流电网并存的局面。图 6 中 AC GRID、GRID1 和 GRID2 可以处于不同的地理位置中。为此, 图 6 所示的方案可以利用较少的换流容量直接互联 3 个区域电网, 而不需要经过多级交流-直流变换。

运行时, 可以利用 VSC1 和 VSC3 控制 GRID1 向 GRID2 传输的功率, 此时 AC GRID 向 GRID2 传输的功率则为 GRID1 向 GRID2 传输功率的 $(E_2 - E_1)/E_1$ 倍。也可以利用 VSC1 和 VSC3 控制 AC GRID 与 GRID2 之间传输的有功功率, 此时 GRID1 向 GRID2 传输的有功功率并不直接受控, 而是 AC GRID 向 GRID2 传输功率的 $E_1/(E_2 - E_1)$ 倍。

3.2 单向整流型直流自耦变压器

图 7 为单向整流型直流自耦变压器。图 7 与图 1 的区别在于, VSC1 和 VSC3 替换为相控换流器 LCC1 和 LCC3。由于在电气接线确定后, LCC1 和 LCC3 只能单向地传输有功功率, 为此图 7 所示方案只能实现由 GRID1 向 GRID2 单向地传输有功功率。

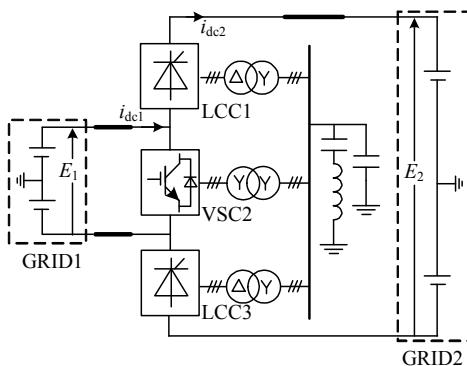


图 7 单向整流型直流自耦变压器

Fig. 7 Unidirectional rectifier type dc autotransformer

单向整流型直流自耦变压器的控制与直流自耦变压器的控制类似。VSC2 用于控制交流母线电压, 而 LCC1 和 LCC3 则用于控制 GRID1 向 GRID2 传输的有功功率。

3.3 单向逆变型直流自耦变压器

图 8 为单向逆变型直流自耦变压器。图 8 与图 7 类似, 区别在于 LCC1 和 LCC3 的接线方式从整流工况转变为逆变工况。

图 8 在电气接线确定时, 只能实现 GRID2 向 GRID1 单向地传输有功功率。

单向逆变型直流自耦变压器的控制与直流自耦变压器的控制类似, VSC2 用于控制交流公共母线的交流电压, LCC1 和 LCC3 则用于控制从 GRID2 向 GRID1 传输的有功功率。

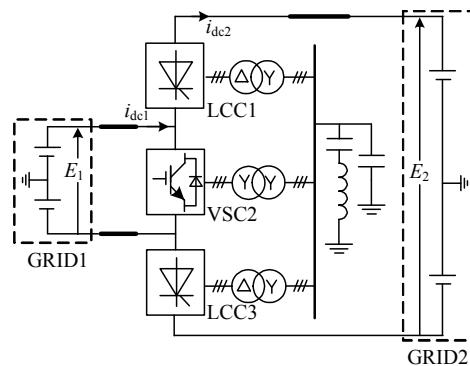


图 8 单向逆变型直流自耦变压器

Fig. 8 Unidirectional inverter type dc autotransformer

4 仿真验证

4.1 有功功率阶跃响应

为验证直流自耦变压器的技术可行性, 在 PSCAD/EMTDC 下搭建了图 1 所示直流自耦变的仿真算例。测试算例用于互联 $\pm 320\text{ kV}$ 及 $\pm 640\text{ kV}$, 额定传输功率为 2000 MW。

图 9 给出了直流自耦变压器对有功功率阶跃指令的响应曲线。有功功率指令值变化率限幅为

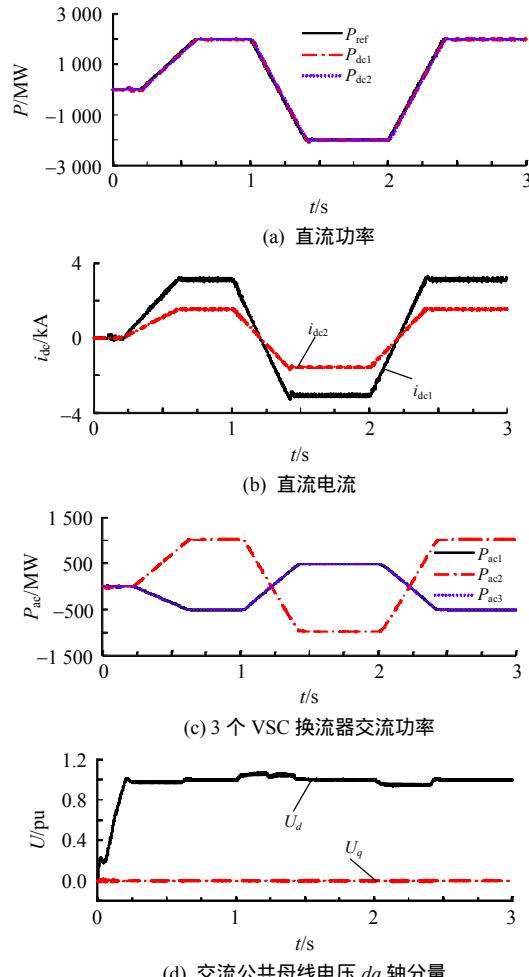


图 9 有功功率阶跃响应曲线

Fig. 9 Response to step power change

$\pm 5 \text{ pu/s}$ 。图9(a)为直流功率曲线,其中 P_{ref} 为GRID1向GRID2传输的有功功率指令值, P_{dc1} 为GRID1输出的直流功率, P_{dc2} 为GRID2输入的直流功率。由图9(a)可知,直流自耦变压器能精确地跟踪直流功率指令值。

图9(b)为直流电流曲线,由于 E_2 是 E_1 的2倍, i_{dc1} 是 i_{dc2} 的2倍(i_{dc1} 和 i_{dc2} 的测量位置参见图1)。

图9(c)为VSC1—VSC3输出的交流功率。对比图9(c)和图9(a)可知,GRID1向GRID2传输的有功功率为2000MW,VSC2输出的有功为1000MW,而VSC1和VSC3逆变的总功率为1000MW,即该直流自耦变压器使用的换流器总容量与两直流系统互联功率相等,且为常规直流变换器所使用的换流器容量的一半。

图9(d)为公共交流母线电压曲线,可知稳态时公共交流母线电压被维持在1pu。

4.2 网间联络器仿真验证

图10为图6所示的网间联络器仿真验证结果。所互联交流电网额定电压330kV,2个直流电网额定电压分别为 $\pm 320 \text{ kV}$ 及 $\pm 640 \text{ kV}$,2个VSC换流器额定功率均为500MW。

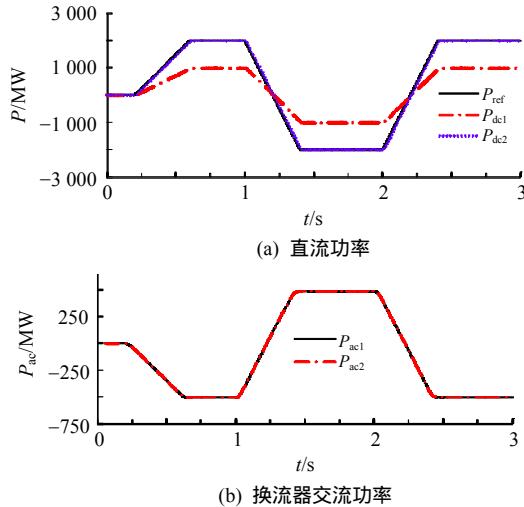


图10 网间联络器仿真验证

Fig. 10 Simulation results of grid interconnector

网间联络器的2个VSC换流器用于控制注入到GRID2的直流功率 P_{dc2} 。在0.2~0.6s, P_{dc2} 的指令值 P_{ref} 由0上升为2000MW;1.0~1.4s, P_{ref} 由2000MW下降为-2000MW;2.0~2.4s, P_{ref} 再次由-2000MW上升为2000MW。图10(a)表明 P_{dc2} 能良好地跟踪其指令值 P_{ref} 。由于GRID1的额定直流电压为GRID2额定直流电压的一半,GRID1向GRID2提供的功率为 P_{ref} 的一半。

图10(b)为2个VSC换流器的逆变功率,2个

VSC换流器向GRID2传输的有功功率总和为GRID2吸收功率的一半。

4.3 单向整流型直流自耦变压器可行性验证

图11为图7所示的单向整流型直流自耦变压器仿真结果。所互联的两个直流电网额定电压仍分别为 $\pm 320 \text{ kV}$ 及 $\pm 640 \text{ kV}$ 。

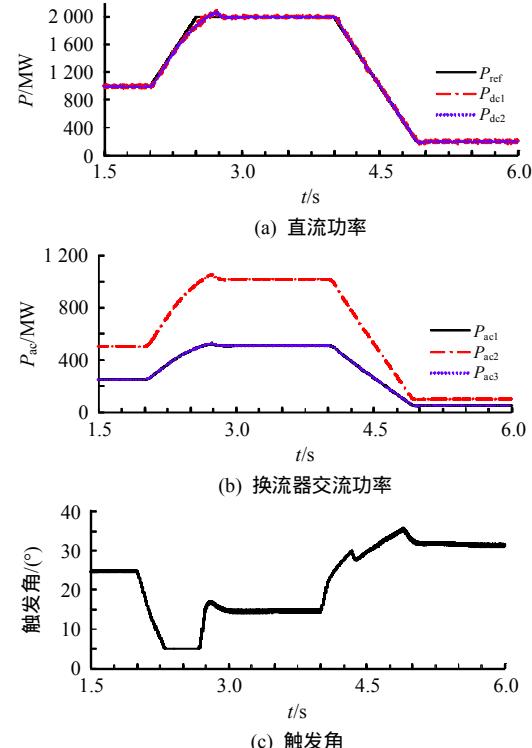


图11 单向整流型自耦变压器仿真验证

Fig. 11 Simulation results of unidirectional rectifier type dc autotransformer

在2.0~2.5s,GRID1向GRID2传输的有功功率指令从1000MW上升至2000MW;4.0~4.9s,该功率指令值从2000MW下降为200MW。图11(a)表明实测有功功率能良好地跟踪功率指令值。

图11(b)为3个换流器的交流功率。LCC1和LCC3整流方向为交流功率正方向(P_{ac1} 和 P_{ac3})。VSC2逆变方向为交流功率正方向(P_{ac2})。由图11(b)可知,2个LCC换流器传输的功率总和为互联功率的一半,VSC2传输的功率也为GRID1和GRID2互联功率的一半。

图11(c)为LCC换流器的触发角。传输的功率上升时,触发角下降,以提高VSC1正极对VSC3负极的直流电压,从而提高直流电流 i_{dc2} 。传输的有功功率下降时,LCC1和LCC3的触发角上升,直流自耦变压器第二端口的直流电压下降,使得直流自耦变压器与 E_2 之间的电压差下降,从而使得 i_{dc2} 下降。

4.4 单向逆变型直流自耦变压器可行性验证

图12为图8所示的单向逆变型直流自耦变压

器仿真结果。在 0.4~0.9s, GRID2 向 GRID1 传输的有功功率指令从 0MW 上升至 2000MW; 1.2~2.1s, GRID2 向 GRID1 传输的有功功率从 2000MW 下降为 200MW。图 12(a)表明实际传输的直流功率能良好地跟踪功率指令值。

图 12(b)为 2 个 LCC 逆变器逆变的交流功率(P_{ac1} 、 P_{ac3})以及 VSC2 从交流侧向整流侧输送的功率。由图 12(b)可知, 2 个 LCC 逆变器传输的功率总和为互联功率的一半, VSC2 传输的功率也为互联功率的一半。

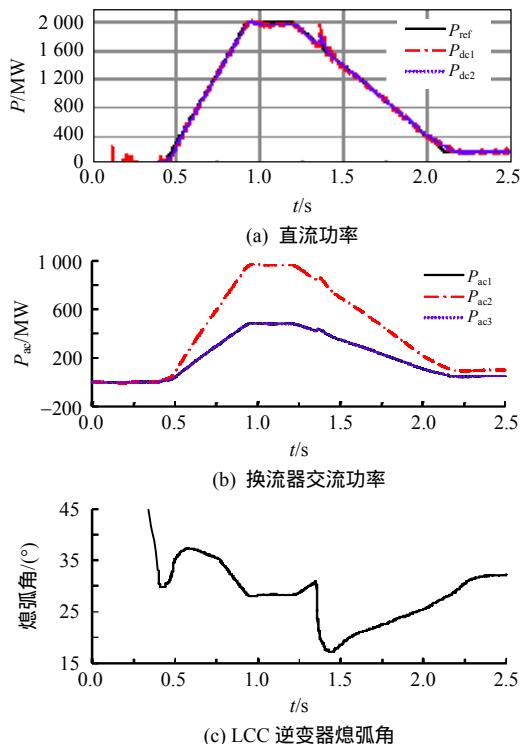


图 12 单向逆变型自耦变压器仿真验证
Fig. 12 Simulation results of unidirectional inverter type dc autotransformer

图 12(c)为 LCC 逆变器的熄弧角。由图 12(c)可知, 在运行范围内, 熄弧角处于安全范围内。

5 结论

本文提出了一种直流自耦变压器的拓扑。该拓扑与常规直流-交流-直流变换技术相比的优点有:

1) 常规直流-交流-直流变换技术所有传输的有功功率都需要经过两级交流/直流变换, 而直流自耦变压器中仅部分传输的有功功率需要进行两级交流/直流变换, 为此直流自耦变所需要的换流器容量远低于常规直流-交流-直流变换技术。

2) 由于仅部分传输的有功功率需要进行两级交流/直流变换, 直流自耦变的损耗远低于常规直流-交流-直流变换技术。

3) 由于另一部分功率可以通过直接电气连接进行传输, 直流自耦变所使用的交流链路容量也远低于常规直流-交流-直流变换技术。

参考文献

- 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.
Wen Jialiang, Wu Rui, Peng Chang, et al. Analysis of dc grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12(in Chinese).
- 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
Tang Guangfu, Luo Xiang, Wei Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17(in Chinese).
- 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(in Chinese).
- 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, Zheng Liqiang, et al. An review of low voltage dc power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 42-52(in Chinese).
- 杨晓峰, 林智钦, 郑琼林, 等. 模块组合多电平变换器的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 1-13.
Yang Xiaofeng, Lin Zhiqin, Zheng Trillion, et al. A review of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 1-13(in Chinese).
- 孙晋坤, 刘庆丰, 冷朝霞, 等. 基于效率模型的 DC-DC 变换器并联系统电流分配策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 10-18.
Sun Jinkun, Liu Qingfeng, Leng Zhaoxia, et al. A current distribution strategy for parallel dc-dc converters based on the efficiency model[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15): 10-18(in Chinese).
- Flourentzou N, Agelidis V, Demetriadis D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- Akhmatov V, Callavik M, Franck C, et al. Technical guidelines and prestandardization work for first HVDC grids[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2014, 29(1): 327-335.
- Lüth T, Merlin M, Green T, et al. High-frequency operation of a DC/AC/DC system for HVDC applications

- [J]. IEEE Trans. on Power Electronics , 2014 , 29(8) : 4107-4115 .
- [10] Ortiz G , Uemura H , Bortis D , et al . Modeling of soft-switching losses of IGBTs in high-power high-efficiency dual-active-bridge dc/dc converters[J]. IEEE Trans. on Electron Devices , 2013 , 60(2) : 587-597 .
- [11] Kheraluwala H ,Gascoigne R ,Divan D ,et al .Performance characterization of a high-power dual active bridge dc-to-dc converter[J] . IEEE Trans. on Industry Applications , 1992 , 28(6) : 1294-1301 .
- [12] Zhao B , Song Q , Liu W , et al . Overview of dual-active-bridge isolated bidirectional dc-dc converter for high-frequency-link power-conversion system [J] . IEEE Trans. on Power Electronics , 2014 , 29(8) : 4091-4106 .
- [13] Qin H , Kimball J . Generalized average modeling of dual active brige dc-dc converter[J] . IEEE Trans. on Power Electronics , 2012 , 27(4) : 2078-2084 .
- [14] Falcones S , Ayyanar R , Mao X . A DC-DC multiport converter based solid state transformer integrating distributed generation and storage[J] . IEEE Trans. on Power Electronics , 2013 , 28(5) : 2192-2203 .
- [15] Jovicic D . Bidirectional , high-power dc transformer [J] . IEEE Trans. on Power Delivery , 2009 , 24(4) : 2276-2283 .
- [16] Jovicic D , Zhang L . LCL DC/DC converter for DC grids[J] . IEEE Trans. on Power Delivery , 2013 , 28(4) : 2071-2079 .
- [17] Jovicic D , Lin W . Multiport high-power LCL dc hub for use in dc transmission grids[J] . IEEE Trans. on Power Delivery , 2014 , 29(2) : 760-768 .
- [18] Lin W , Jovicic D . Reconfigurable multiphase multi GW LCL DC hub with high security and redundancy [J] .Electric Power System Research ,2014 ,110 :104-112 .
- [19] Chen W ,Huang A ,Li C ,et al .Analysis and comparison of medium voltage high power dc/dc converters for offshore wind energy systems[J] . IEEE Trans. on Power Electronics , 2013 , 28(4) : 2014-2023 .
- [20] 陈名 ,饶宏 ,李立涅 ,等 .南澳柔性直流输电系统主接线分析[J] .南方电网技术 , 2012 , 6(6) : 1-5 . Chen Ming ,Rao Hong ,Li Licheng ,et al .Analysis on the main wiring of Nan'ao VSC-HVDC transmission system [J] . Southern Power System Technology , 2012 , 6(6) : 1-5(in Chinese) .



林卫星

收稿日期 : 2014-07-05。

作者简介 :

林卫星(1986) ,男 ,博士 ,主要从事直
流-直流自耦变压器、直流-直流变换器、
直流输电、直流电网、MMC、风力发电的
研究 ,weixinglin@foxmail.com ;

文劲宇(1970) ,男 ,教授 ,博士生导师 ,
本文通讯作者 ,主要研究方向为电力系统
运行与控制、储能与新能源并网、微电网
与舰船电力系统等 ,jinyu.wen@hust.edu.
cn ;

程时杰(1945) ,男 ,教授 ,博士生导师 ,
中国科学院院士 ,IEEE Fellow ,主要研究
方向为储能技术、人工智能在电力系统中
的应用、电力系统运行与控制、超导电
力等。

(责任编辑 李婧妍)