

一种新型拓扑的背靠背柔性直流输电系统及其仿真

周国梁, 石新春

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 从降低电力电子器件直接串联数目、器件开关频率和简化主电路拓扑结构 3 个方面出发, 提出一种基于模块级联的背靠背柔性直流输电结构。选用了高压大电流、低导通损耗而开关频率却相对较低的开关器件 IGCT, 设计了基于该系统模型的控制策略, 确定了其控制策略。MATLAB 软件仿真结果证实了笔者提出的背靠背柔性直流输电系统模型的正确性和控制策略的有效性。

关键词: 柔性直流输电; 背靠背; IGCT; 拓扑; 模块级联

中图分类号: TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)02-0104-03

A Novel HVDC-flexible System and Its Simulation

ZHOU Guo-liang, SHI Xin-chun

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: To decrease direct serial number and switching frequency of electronic devices, and simplify the main circuit topology, a module-cascade based BTB HVDC-flexible system is proposed. The converter module operates with a fairly low switching frequency, and thus the low-switching power electronic device IGCT is selected due to its high power and low conducting loss. A mathematical model is developed for the multi-module-converter based HVDC-flexible system, and a controller is designed for the HVDC-flexible system based on the model. Performance of the HVDC-flexible system and effectiveness of the designed controller are verified via digital time-domain simulations with the software MATLAB.

Key words: HVDC-Flexible; BTB; IGCT; topology; module-cascade

0 引言

柔性直流输电具有有功无功可独立调节、无需大容量的无功补偿和滤波器、不会出现换相失败、受端可连接于无源系统等诸多优点^[1], 近年来已在新能源发电系统联网^[2]、不同交流系统的非同步连接^[3]、向近海钻井平台等无源系统供电^[4]等场合得到应用。柔性直流输电技术在我国有广阔的应用领域: 为负荷密集的城区供电、海岛供电、小型风力及水力电站联接等提供新的接入方式, 利用有限的输电走廊输送更多电能, 因此采用柔性直流输电技术已有现实意义。随着电力市场的发展, 发展区域电网之间的背靠背柔性直流输电互联是解决区域电网之间潮流的控制、区域电网间电力市场实时交易问题的最佳方案。

笔者从降低电力电子器件直接串联数目、器件开关频率和简化主电路拓扑结构 3 个方面确定实际采用的主电路方案, 提出一种采用了 IGCT 器件、基于多绕组变压器隔离的模块级联式背靠背柔性直流输电模型, MATLAB 软件仿真验证了所提出新型拓

扑及其控制策略的优越性和可行性。

1 拓扑与开关器件选择

多电平拓扑的应用可以降低器件的直接串并联数量、降低电压上升率、提高波形质量, 在大功率变频器中得到了广泛的应用。但多电平拓扑由于其结构与控制的复杂性以及电容电压平衡问题, 电平数不宜过多, 且电容电压平衡控制与系统电流波形控制存在矛盾, 尤其是在系统不平衡条件下这一矛盾尤为突出, 因此该拓扑很难用于可靠性要求很高的直流输电。

目前世界上只有 ABB 公司具有柔性直流输电系统实际工程业绩, 其已投运的部分工程参数和指标可参考文[5]中的表 2。从表中可以看出, 已投运系统均采用了两电平或三电平结构, 开关频率均高于 1 kHz, 因此多选用了开关频率较高而功率容量较小的 IGBT 器件, 采用串并联技术以提高功率等级。作为趋势代表性工程 Estlink, 其拓扑将继续采用电路复杂度低的两电平结构; 受拓扑结构限制, 开关频率则选的较低以降低其损耗; 受可控性与波形质量的限制, 其开关频率又不能选的太低。因此降低损耗与可控性之间存在矛盾。

收稿日期: 2007-08-09; 修回日期: 2007-12-27

作者简介: 周国梁(1980-), 男, 博士研究生, 研究方向为柔性交直流输电技术和电能质量。

传统 HVDC 为提高波形质量采用了 12 或 24 脉动整流, 通过移相变压器联接达到减小直流波动和系统电流谐波的目的。对于采用全控器件的柔性直流输电系统, 也可以采用类似的方法达到降低器件开关频率、减小系统电流谐波、减小直流电压波动的目的, 且其变压器无需采用复杂的移相结构, 更易实现模块化。

对于器件而言, 目前大功率开关器件主要有 GTO、IGBT、IGCT。GTO 的导电损耗小, 但开关损耗大、开关频率低、控制功率大、驱动电路复杂、缓冲电路笨重且昂贵, 因此已面临淘汰。IGBT 与 GTO 相比, 具有开关速度快、驱动电路简单, 但其导电损耗较大, 且容量无法与 GTO 相比, 随着单支容量的增大, IGBT 的导通损耗也随之增加, 这一问题在低频调制场合尤为突出, 因为在低频调制时导通损耗是器件损耗的主要因素。为解决这一问题, 结合 GTO 高压大电流、低导通损耗与 IGBT 驱动简单、开关速度快、易于串联的优点, 将改进型 GTO 与极低的电感栅极驱动混合为一体, 制造出了新型电力电子器件——IGCT。IGCT 驱动复杂程度与 IGBT 相当, 而在低频调制时总体损耗却小于 IGBT, 且 IGCT 具备容量优势, 在大功率领域更具优势^[6]。从器件损坏特性比较看, IGBT 损坏后为开路, IGCT 模块损坏后为短路状态, 这点对于要求高可靠性的柔性直流输电系统来说很重要, 因为 IGBT 阀中有 IGBT 模块损坏后, 需对该模块进行更换后才能工作; IGCT 阀则可利用器件冗余而无需停运。高可靠性是柔性直流输电系统应用 IGCT 阀的另一突出优势。

笔者提出一种背靠背柔性直流输电新型拓扑, 见图 1。系统两侧均由 4 个换流器单元通过变压器接入交流系统, 直流侧电容则串联以提高直流电压等级。通过顺序采样空间矢量调制法^[7]提高等效开关频率, 以四模块为例, 在系统等效开关频率为 1.2 kHz 时, 每个模块的器件开关频率仅为 300 Hz。因此可以达到可控性高、损耗小、电路复杂程度低的要求。在某个模块发生故障时, 可切除该模块, 控制系统时基相应改变即可, 在系统传输能力条件下有可能不影响系统传输功率。但此时对系统谐波有一定影响, 在滤波器设计时可考虑这一问题来设计其截至频率, 从而减小故障造成的影响。

2 系统模型与控制策略

笔者的分析设计涉及不同电压等级, 为方便归算, 采用标么值(p.u.)系统进行分析 and 仿真。

设图 1 中变流器 VSC₁ 工作在定直流电压控制模式, 变流器 VSC₂ 工作在功率控制模式。系统电压电流关系满足

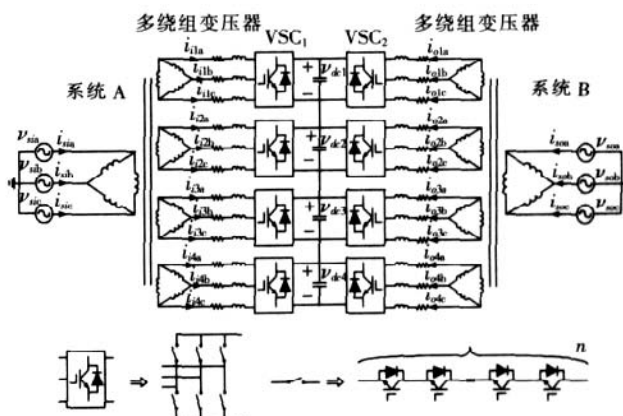


图 1 四模块变流器级联型背靠背 VSC-HVDC 系统

$$\begin{cases} [s]_{abc} = R_s [i_{ij}]_{abc} + L_s p([i_{ij}]_{abc}) + [c]_{abc} \\ [so]_{abc} = R_{so} [i_q]_{abc} + L_s p([i_q]_{abc}) + [c_q]_{abc} \\ p([c_q]) = ([m_j]_{abc} [i_{ij}]_{abc} - i_{dc,oad}) / C \end{cases} \quad (1)$$

下标定义为: i 为 VSC₁ 侧; o 为 VSC₂ 侧; s 为高压侧; c 为变流器输出侧; j 为第 j 个变流器模块; p 为微分算子。abc/dq 变换矩阵 T 为

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin t & \sin(t-2/3) & \cos(t+2/3) \\ \cos t & \cos(t-2/3) & \sin(t+2/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

以 VSC₁ 侧为例, 将式 (1) 通过式 (2) 变换到 dq 坐标下为

$$\begin{cases} p(i_{dj}) = i_{dqj} + (V_d - 0.5m_{ij} \cos_{ij} - R_s i_{dj}) / L_s \\ p(i_{qj}) = i_{dqj} + (V_q - 0.5m_{ij} \sin_{ij} - R_s i_{qj}) / L_s \\ p([c_q]) = [0.5m_{ij} (\cos_{ij} i_{dqj} + \sin_{ij} i_{qj}) - i_{dc,oad}] / C \end{cases} \quad (3)$$

VSC₂ 侧变流器从交流系统吸收的功率为

$$\begin{cases} p_q = V_o^d i_q^d \\ Q_q = -V_o^d i_q^q \end{cases} \quad (4)$$

系统控制框图见图 2。系统采用了顺序采样空间矢量调制的方法, 4 个变流器模块采用了不同的时基进行采样和计算控制, 从而 4 倍地提高了其系统等效开关频率。

3 仿真

3.1 系统参数

为了验证背靠背柔性直流输电系统模型与控制策略的正确性和可行性, 笔者采用 MATLAB 进行仿真试验。仿真所采用的系统参数为: 仿真步长为 5 μ s, 控制计算时间为 100 μ s, VSC₁ 侧变压器额定容量 $S=100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $f_1=50 \text{ Hz}$, 变比为 110kV/4 \times 12kV, $R_s=0.001 \text{ p.u.}$, $L_s=0.2 \text{ p.u.}$, VSC₂ 侧变压器额定容量 $S_o=100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $f_o=50 \text{ Hz}$, 变比为 220kV/4 \times 12kV, $R_{so}=0.001 \text{ p.u.}$, $L_{so}=0.2 \text{ p.u.}$, PI(1) 比例系数为 7.5, 积分系数为 800, PI(2) 比例系数为 0.3, 积分系数为 20, PI(3) 比例系数为 1, 积分系数为 100, PWM 开关频率为 300 Hz, 直流侧电容为 2 500 μ F, 参考电压为 25 kV。

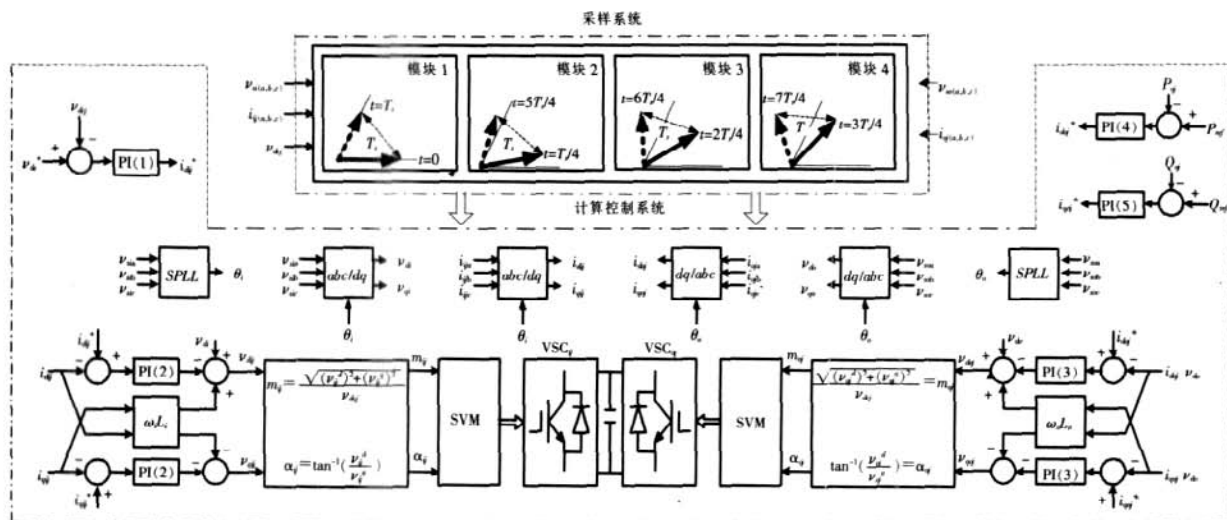


图2 dq 坐标系统控制模型

3.2 仿真波形

图3给出了系统稳态电流波形。图3(b)~(e)为变流器1~4电流波形，从图中可以看出电流所含谐波成分较大，但其相位错开一定角度。图3(a)为高压侧电流波形，合成的结果使得总电流非常接近正弦，谐波成分较小。

图4给出了系统稳态电压波形。图4(b)~(e)为各变流器直流电容电压波形。图4(a)为直流侧总电容电压波形，从图中可以看出各个电容波动相互抵消，合成的结果使得总电容电压波形波动减小。

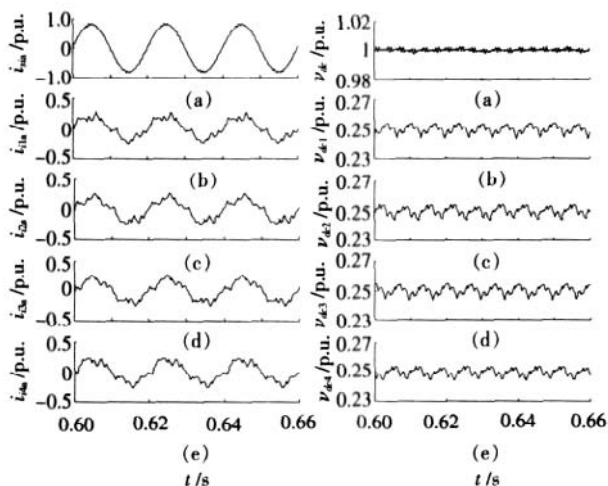


图3 系统稳态电流波形

图4 直流电压稳态波形

图5给出了系统动态响应波形。VSC₂ 侧于 0.4 s 有功指令由 0.4 p.u.变为 0.8 p.u., 无功指令由 0 变为 0.2 p.u. 图5(a)、(b)分别为 VSC₁ 侧与 VSC₂ 侧的有功无功响应波形；图5(c)、(d)分别为直流侧电容总电压与各个电容电压的响应波形；图5(e)、(f)、(g)、(h)分别为整流侧和逆变侧 1 号变流器模块电流的 d 轴和 q 轴分量的响应波形。从图中可以看出，模块级联式拓扑在其控制策略下能快速、精确的调节有功无功，且维持直流侧电压的稳定性。

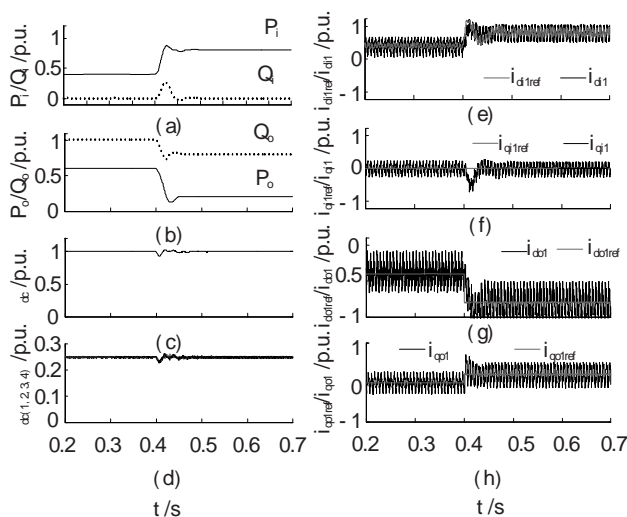


图5 系统动态响应波形

4 结论

(1) 从降低电力电子器件直接串联数目、器件开关频率和简化主电路拓扑结构 3 个方面出发，提出了新型背靠背柔性直流输电拓扑。

(2) 针对目前大功率电力电子器件特性，结合该拓扑优点，采用了 IGCT 器件。

(3) 与传统结构相比具有以下优点：器件开关频率低；器件串并联数量少；系统等效开关频率高；损耗和 EMI 小；拓扑结构简单且易于扩展；系统可靠性高。

参考文献:

- [1] 文俊, 张一工, 韩民晓, 等. 轻型直流输电——一种新一代的 HVDC 技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-51.
- [2] AXELSSON U, HOLM A, LIJEGREN C, et al. The Gotland HVDC Light Project Experiences from Trial and Commercial Operation [C]// CIGRE Conference Publication No.482. IEE 2001: 14-18.
- [3] PETERSSON A, EDRIS A. Dynamic Performance of the Eagle Pass Back-to-back HVDC Light (下转第 109 页)

电电压高于 30 kV 至电弧放电时, 在 5 ~ 10 kHz 频段产生一个明显的峰值, 峰值中心、带宽大小随试验条件的不同而稍有变化。

综上所述, 对于不同的电极形式和放电距离, 弧声功率谱除了在 5 ~ 10 kHz 的频段以外, 其它频段上与背景噪声功率谱没有显著区别, 也就是说故障电弧早期弧声的频率处在 5 ~ 10 kHz 频段内。该特征频段的峰值中心、强度大小和频带宽度随试验条件的不同而稍有变化。其中尖形电极带宽最窄、能量强度最小, 棒形电极带宽最宽、能量强度最大。

3 早期弧声的信噪比分析

为了考查弧声信号与外界随机噪声信号的强度大小, 给出了棒形电极的故障电弧弧声功率谱曲线。图 5 是棒形电极在间距 75 mm 下的故障电弧弧声功率谱曲线, 其中图 5(b) 为背景声谱, 图 5(a) 为放电电压在 30 ~ 40 kV 过程的功率谱图。由图 5(b) 可知, 背景噪声谱值都很大, 尤其在 100 Hz 以下的低频段, 干扰信号谱值在 10^4 数量级以上。而对于图 5(a), 在 5 ~ 10 kHz 的弧声频段里, 弧声信号谱值仅在 10^1 数量级内, 信噪比可达 80 dB。因此, 故障电弧早期弧声信号是非常微弱的, 被淹没在强大背景噪声中。

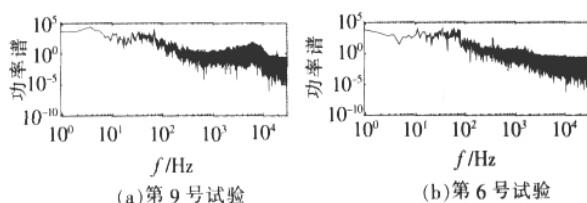


图 5 棒形电极弧声功率谱图

根据以上实验结果, 弧声可以作为故障电弧早期探测的一个状态参量, 利用弧声这个特征频带可以进行故障电弧的早期探测预警, 把传统的故障电弧被动检测方法升级为主动的防护机制, 有利于将故障电弧消除在事故发生之前。

4 结语

笔者建立了故障电弧探测试验平台, 采用功率谱分析的方法对故障电弧发生早期的弧声频谱进行

了深入的试验研究, 得到了故障电弧发生早期乃至电弧放电过程电弧声的频率主要集中在可听波 5 ~ 10 kHz 的波段, 其带宽、中心频率和能量大小与电极形式、放电距离、放电电压有密切关系, 而且弧声信号非常微弱。通过在线监测该特征频带的微弱弧声是否存在就可以实现开关柜故障电弧的早期探测预警。

参考文献:

- [1] SIDHU T S, GURDEEP SINGH, SACHDEV M S. Arcing Fault Detection Using Artificial Neural Networks [J]. Neurocomputing, 1998, 27(7): 225-241.
- [2] SIDHU T S. Protection of Power System Apparatus Against Arcing faults [C]// 1998 IEEE Region 10 International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control, 1998: 436-439.
- [3] SIDHU T S, SACHDEV M S, SAGOO G S. Detection and Location of Low-level Arcing Faults in Metal-clad Electrical Apparatus [C]// Developments in Power System Protection, 2001: 157-160.
- [4] SIDHU T S, SAGOO G S, SACHDEV M S. Multi-sensor Secondary Device for Detection of Low-level Arcing Faults in Metal-clad MCC Switchgear Panel [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(1): 129-134.
- [5] LAND H B, EDDINS C L, GAUTHIER L R, et al. Design of a Sensor to Predict Arcing Faults in Nuclear Switchgear[J]. IEEE Trans on Nuclear Science, 2003, 50(4): 1161-1165.
- [6] 蔡彬, 陈德桂, 吴锐, 等. 开关柜内部故障电弧的在线检测和保护装置[J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 83-87.
- [7] MANZ A F. Welding Arc Sounds[J]. Welding Journal, 1981, 60(5): 23-27.
- [8] SAINI D, FLOYD S. An investigation of Gas Metal Arc Welding Sound Signature for On-line Quality Control [J]. Welding Journal, 1998, 77(4): 172-179.
- [9] CUDINA M, PREZELJ J. Evaluation of the Sound Signal Based on the Welding Current in the Gas Metal Arc Metal Welding Process [J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, 2003, 217(5): 483-494.
- [10] 顾文业, 王志敏, 顾晓安. 应用超声波测量法判断变压器内部局部放电的研究[J]. 噪声与振动控制, 2003(2): 46-48.
- [11] 马跃洲, 金虎, 梁卫东, 等. 短路过渡的 GMAW 电弧声信号特征及产生机理[J]. 甘肃工业大学学报, 2003(1): 11-14.
- [12] 马跃洲, 马春伟. 基于电弧声波特征的 CO₂ 焊接飞溅预测[J]. 焊接学报, 2002(3): 19-22.

(上接第 106 页)

- [4] HYTTINEN M, LAMELL J O, NESTLI T F. New Application of Voltage Source Converter (VSC) HVDC to be Installed on the Gas Platform Troll A [C]// CIGRE Session, 2004: B4-210.
- [5] JACOBSON B, JIANG-HAFNER Y, REY P, et al. HVDC with Voltage Source Converters and Extruded Cables for up to 800 kV and 1000 MW[C]// CIGRE Session, 2006: B4-105.

- [6] STEFFEN BERNET, RALPH TEICHMANN, ADRIAN ZUCKERBERGER, et al. Comparison of High-power IGBT's and Hard-driven GTO's for High-power Inverters [J]. IEEE Trans. Industry Application, 1999, 35(2): 487-495.
- [7] EDUARDO P WIECHMANN, ROLANDO P BURGOS, JOACHIM HOLTZ. Current-source Drives Using Sequential Sampling Synchronous Space-vector Modulation[J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 2003, 50(6): 1275-1289.