

中压柔直换流阀系统控制策略研究

崔 杰, 武立国

(北京华能新锐控制技术有限公司, 北京 102209)

摘要: 随着配电系统的不断发展, 对中压配电网柔直输电系统的应用需求日益广泛。主要阐述三电平换流阀在中压柔直系统中的应用, 并对中压柔直系统关键技术问题进行了仿真分析和试验验证。实践表明, 提到的中压柔直系统的实现方案具有经济性、可行性。自适应控制的应用明显提高了柔直系统的自由度和可靠性。

关键词: 柔性直流输电; 三电平逆变器; 直流电压控制; 虚拟同步控制; 自适应控制

Research on control strategy of medium voltage flexible direct current converter system

CUI Jie, WU Liguo

(Beijing Huaneng Xinrui Control Technology Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: With the continuous development of the power distribution system, the application demand for the flexible direct transmission system is increasingly widespread. The application of three-level converter in flexible direct current transmission system is described, and the key technical problems is verified. Practice shows that the implementation scheme of flexible direct current transmission system mentioned in this paper is economical and feasible. The application of adaptive control significantly improves the freedom degree and reliability of the flexible direct current system.

Key words: flexible direct current transmission; three level inverter; DC voltage control; virtual synchronization control; adaptive control

0 引言

随着电力电子技术的不断进步, 使得采用 IGBT 作为功率器件的电压源变换器 (Voltage Source Converter, VSC) 来进行直流输电成为可能。由于电压源变换器的输出电压和功率可控, 并且能够实现四象限运行, 所以称之为柔性直流输电。常规高压直流输电一般采用晶闸管实现整流和逆变, 其采用的电网换相变换器 (Line Commutated Converter, LCC) 须借助电网电压进行换相。目前, 中压直流输电多采用模块化多电平变换器 (Modular Multilevel Converter,

MMC) 结构^[1]。

由于柔直系统电压等级一般较高, 需要 MMC 进行级联, 从而造成控制系统结构复杂, 控制算法实现难度加大, 对系统可靠性有所影响^[2]。本文提到的柔性直流输电拓扑采用中性点钳位 (Neutral Point Clamped, NPC) 逆变器级联结构, 每个 NPC 单元可实现独立控制, 子模块控制器负责完成电压控制、电流控制、功率控制以及脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 等功能, 而主控制器则主要负责模块间的协调控制、站级控制等功能, 控制结构简单,

非常适合容量较小的柔性直流输电应用场合^[3-4]。本文将对此柔性直流输电系统中关键问题和控制策略进行分析研究。

1 级联型柔直系统拓扑结构

级联型柔直系统主要由交流柜、变压器柜、换流阀柜、直流柜以及控保柜组成。图1为单极柔直系统的主电路拓扑结构。

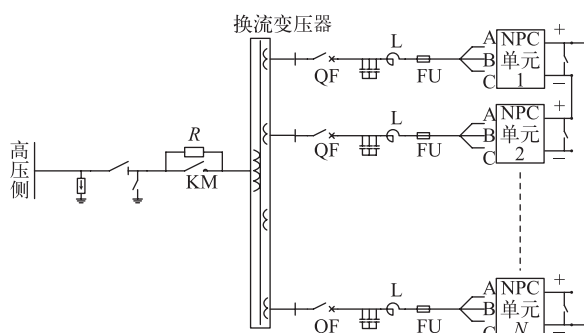


图1 单极柔直系统主电路拓扑

Fig. 1 Main circuit topology of single pole flexible dc system

1.1 换流阀单元设计

换流阀采用NPC结构，每相有4支IGBT和2支钳位二极管。为实现直流故障穿越及故障模块的隔离，在直流侧增加了闭锁、旁路保护单元，如图2所示。当某一换流阀故障后，其会自动旁路，实现故障模块与系统的隔离，提高了系统的可靠性。

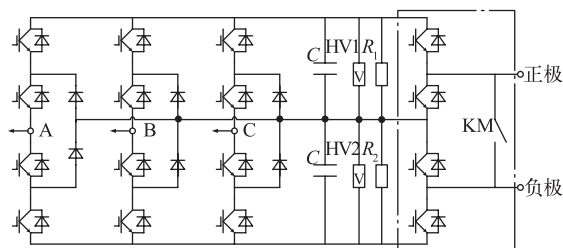


图2 换流阀结构

Fig. 2 Structure of converter valve

1.2 滤波电抗器设计

交流滤波器的参数设计需要考虑交换器的功率等级、电感电流纹波要求、交流频率以及开关频率等因素，并网交换器滤波电感与电流纹波关系式为

$$L = \frac{U_{gL-Lmax}}{2\sqrt{3} \times \sqrt{6} \Delta i_L f_s} \quad (1)$$

式中， $U_{gL-Lmax}$ 为电网电压最大值的有效值； f_s 为开关频率； Δi_L 为交流侧电感纹波电流。

经过计算和仿真验证，交流滤波电抗器选择电感值为0.8 mH。

1.3 直流保护设计

直流系统一般设有直流电抗器和接地电阻等，直流电抗器的主要作用是当直流发生故障时，抑制故障电流上升速率和过电流，使得换流阀闭锁前的故障电流小于功率器件所能承受的最大电流，同时可以阻挡侵入架空线的雷电波^[5-7]。如图3和图4所示，当直流侧设有电抗器时，故障电流的幅值和上升速率得到明显抑制，使其在功率器件的承受范围之内，避免了故障范围的扩大化。

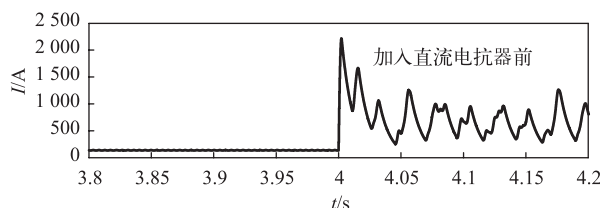


图3 短路电流（不含直流电抗器）

Fig. 3 Short current (excluding dc reactor)

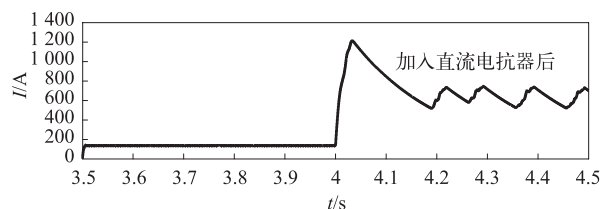


图4 短路电流（含直流电抗器）

Fig. 4 Short current (including dc reactor)

接地电阻是指直流金属回线的接地电阻。其主要作用为抑制严重故障时的故障过电流及过电压，使系统及功率器件的电压、电流应力水平不超限。当直流单极发生接地短路瞬时故障时，如果不加接地电阻，故障恢复瞬间极可能产生数倍的过电压^[8]。

2 控制系统设计

本控制系统采用主从控制结构，每个单极控

制系统由1个主控制器和 N 个从控制器组成,整体架构如图5所示。主控制器主要负责模块间的协调控制、站级控制等,从控制器则主要负责电流控制、PWM等工作^[9]。

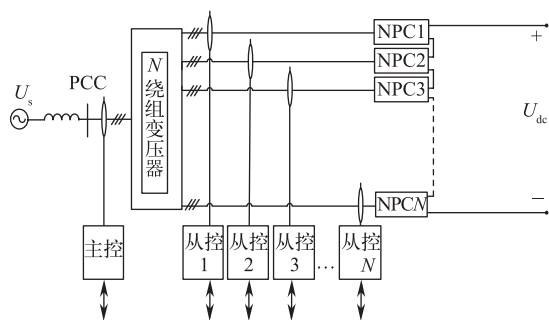


图5 控制结构图

Fig. 5 Control structure diagram

2.1 自适应直流电压控制

由于柔直系统一般采用级联结构,当直流母线电压一定时,控制系统可根据当前系统的控制模式、换流阀级联数量以及电压限值自动匹配换流阀的直流电压指令值。自适应直流电压控制可以有效提高系统的安全性,减少因操作失误造成的直流过电压。电压指令自动匹配校正如图6所示。

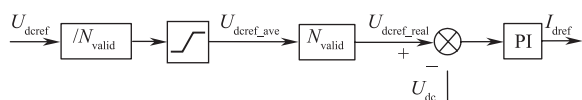


图6 电压指令自动匹配校正

Fig. 6 Automatic matching correction of voltage command

对于定有功功率或者定孤岛频率控制的一端,虽然直流正负极母线电压可以得到控制,但是各个NPC的直流电压将产生偏差,影响系统稳定运行,因此,必须附加直流均压控制^[10-12]。

均直流均压控制需要主控制器对从控制器上传的各个NPC的直流电压进行求平均值计算,然后主控制器将计算均值下发给各个从控制器,结构框图如图7所示。

从控制器则以各个NPC单元的直流侧电压为控制量,以从主控制器接收的直流电压平均值为目标量,通过PI控制器生成 d 轴附加电流参考值,如图8所示。

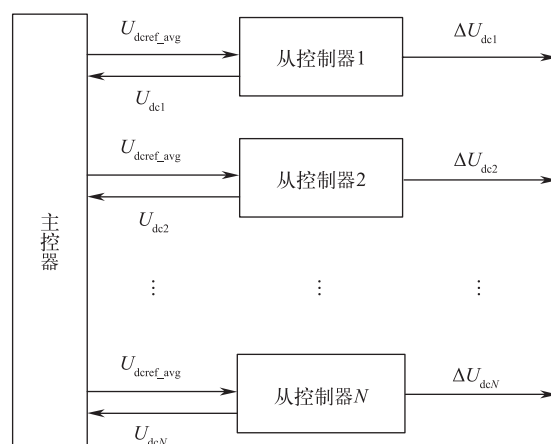


图7 直流均压框图

Fig. 7 Diagram of DC voltage equalization

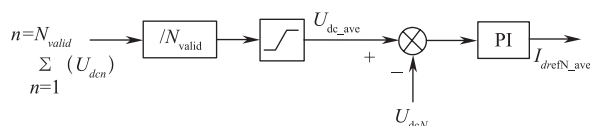


图8 直流均压环控制

Fig. 8 Diagram of DC voltage equalization control

2.2 负序控制

系统在正常稳态运行时只有正序分量,但是当交流系统发生不对称故障时,系统将产生负序和零序分量,其中零序分量通过换流器得到隔离,无须采取控制措施;而负序分量,即负序电压和负序电流将通过换流器流入阀侧,使得电流发生畸变,引起换流站与交流系统交换功率和直流电压发生波动,威胁换流器及系统的安全稳定运行。因此有必要采取附加的负序控制,使得交流系统发生不对称故障时,保障换流器及系统的安全稳定运行。负序控制框图如图9所示。

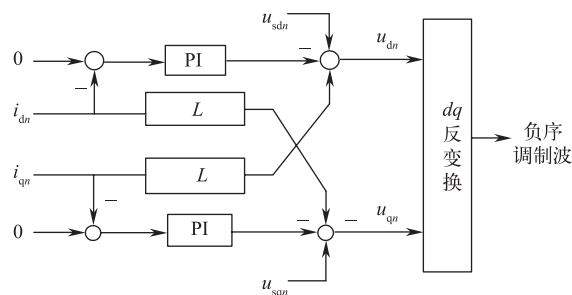


图9 负序控制框图

Fig. 9 Negative sequence control diagram

图10为负序控制的仿真波形图,当10 kV侧

交流电压发生电压跌落时, 交流电流依然能够平衡输出。

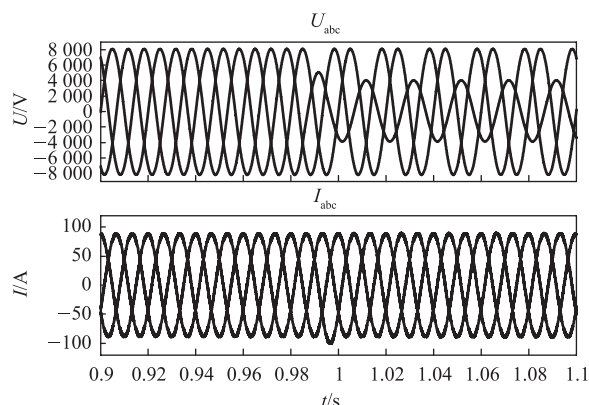


图 10 负序控制仿真波形

Fig. 10 Simulation waveform of negative sequence control

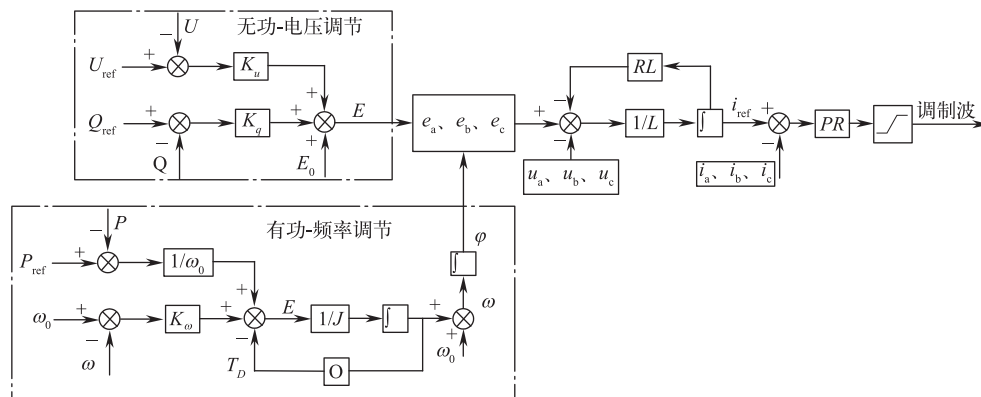


图 11 虚拟同步控制框图

Fig. 11 Diagram of virtual synchronization control

$$J = \begin{cases} J_0 & (\Delta\omega^2 / \Delta t \leq 0) \vee (|\Delta\omega / \Delta t| \leq T_j) \\ J_0 + K_j |\Delta\omega / \Delta t| & \begin{cases} \Delta\omega^2 / \Delta t > 0 \\ |\Delta\omega / \Delta t| > T_j \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

$$D = \begin{cases} D_0 & |\Delta\omega| \leq T_d \\ D_0 + K_d |\Delta\omega| & |\Delta\omega| > T_d \end{cases} \quad (3)$$

式中, J_0 和 D_0 分别为稳定运行时的转动惯量和阻尼系数; K_j 和 K_d 分别为转动惯量和阻尼系数的调节因子; T_j 和 T_d 分别为转动惯量和阻尼系数的变化阈值。

3 仿真和试验

本柔直系统单极容量为 $1.5 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 采用6组换流阀级联, 每组换流阀额定容量 $250 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 。考虑到系统冗余, 实际每极采用7组换流阀级

2.3 自适应虚拟同步控制

虚拟同步控制框图如图11所示, 根据无功-电压调节和有功-频率调节得到参考电压的幅值和相角, 然后根据电路电压方程得到电流参考值, 从而实现虚拟同步控制。相比于传统的 V/F 控制, 虚拟同步控制进行并离网切换时不需要进行控制环路切换, 而是运行在同一个控制模式下, 平滑过渡。

虚拟同步控制的核心在于模拟转动惯量 J 和阻尼系数 D , 转动惯量 J 主要由虚拟转子角速度变化量和变化率同时决定, 阻尼系数 D 主要由虚拟转子角速度变化量决定^[13]。转动惯量 J 和阻尼系数 D 的自适应选择策略为

联。交流系统电压等级为 10 kV , 直流母线电压等级为 10 kV , 换流器电压等级为 $10 \text{ kV}/0.69 \text{ kV}$ 。

3.1 定直流电压控制

图12和图13分别为定直流电压控制的仿真波形和试验波形, 从波形看实际波形与仿真波形控制效果一致, 目标电压为 10 kV 。

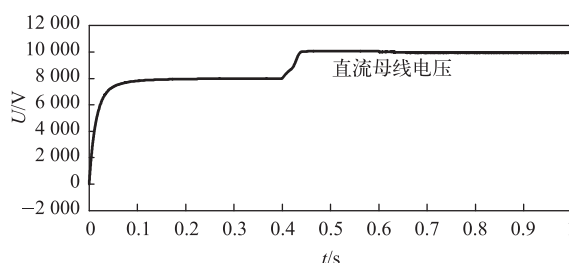


图 12 定直流电压控制仿真波形

Fig. 12 Simulation waveform of DC voltage control

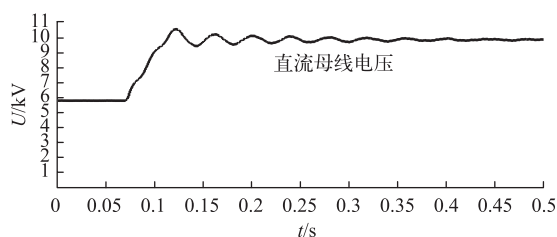


图 13 定直流电压控制试验录波波形

Fig. 13 Test waveform of DC voltage control

3.2 均直流电压控制

图14为均直流电压控制的仿真波形，在0.02 s 时加入均压控制，直流电压开始逐渐均衡，最终每组换流阀直流电压维持在理论值1 667 V左右，6组换流阀级联得到直流母线电压10 kV。图15为均直流电压控制的试验波形。从波形看实际波形与仿真波形控制效果一致，均压效果明显，各阀组间直流电压一致。

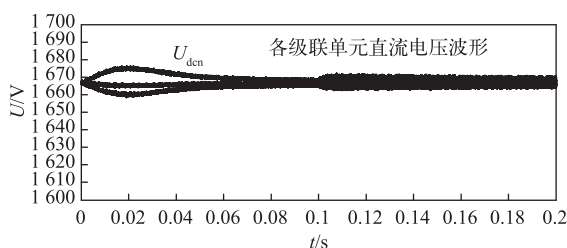


图 14 均直流电压控制仿真波形

Fig. 14 Simulation waveform of DC voltage equalization control

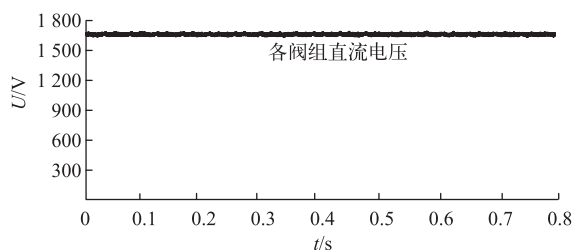


图 15 均直流电压控制试验录波波形

Fig. 15 Test waveform of DC voltage equalization control

3.3 虚拟同步控制

图16为离网模式下虚拟同步控制的仿真波形，交流10 kV侧输出的相电压幅值为8.16 kV，与目标值一致。图17为离网模式下柔直系统的试验录波波形，从图17中可以看出系统交流电压建立迅速，交流电压频率输出稳定，能够根据负载变化及时调整，波动范围较小，基本维持在

49.5~50.5 Hz之间。

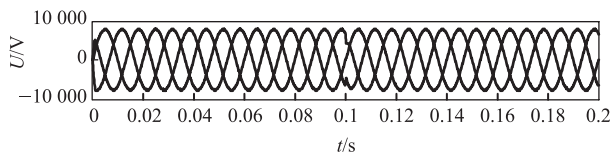


图 16 虚拟同步控制电压仿真波形

Fig. 16 Simulation waveform of virtual synchronization control

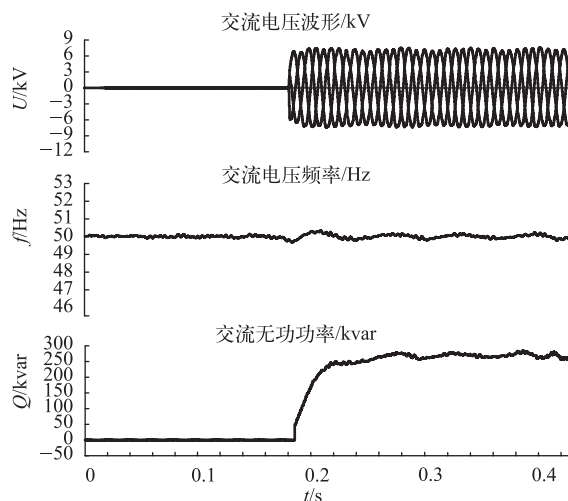


图 17 虚拟同步控制试验录波波形

Fig. 17 Test waveform of virtual synchronization control

4 结束语

本文通过对中压配电网柔直系统关键共性问题提出了相应的实现方案，并对相应控制策略进行仿真分析，验证了各控制策略的合理性。此外，与实际工程相结合，首次将NPC换流阀结构应用中压配电网柔直系统中，并对其进行了相应的试验验证。结果表明本文提出的各方案具有可行性，极大地增加了输电的灵活性，为将来中压配电网柔直系统的推广应用起到了一定的示范作用。

参考文献

- [1] 梁君君, 夏成军, 李创煌, 等. 基于MMC的三端柔性直流输电系统建模与仿真[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(12): 78-83, 90.
- [2] 刘泽洪, 郭贤珊. 高压大容量柔性直流换流阀可靠性提升关键技术研究与应用[J]. 电网技

- 术, 2020, 44(9): 3604-3613.
- [3] 吴杰. 多端柔性直流输电系统运行控制策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [4] 赵辉, 李瑞, 王红君, 等. 60° 坐标系下三电平逆变器SVPWM方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2008(24): 39-45.
- [5] 李英彪, 卜广全, 王姗姗, 等. 张北柔直电网工程直流线路短路过程中直流过电压分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3391-3399, 3666.
- [6] 周光阳, 李妍, 何大瑞, 等. 含限流器的多端柔直系统故障保护策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7): 1432-1443.
- [7] 谭翔宇, 任丽, 唐跃进, 等. 饱和铁心型超导限流器在柔直系统中的限流特性研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S2): 556-561.
- [8] 梅念, 陈东, 吴方劫, 等. 基于MMC的柔性直流系统接地方式研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1247-1253.
- [9] 闵睿, 蓝海波, 翟丙旭, 等. 张北柔直电网运行协调控制关键技术及控制策略探讨[J]. 华北电力技术, 2017(11): 44-48.
- [10] 唐庚, 徐政, 刘昇, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的新型直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 125-132.
- [11] 陈树泉, 张兆云, 李天利. 基于模糊下垂控制的直流微电网电压稳定控制研究[J]. 电气技术, 2020, 21(8): 40-45.
- [12] 白国岩, 李春宝, 孟繁丞, 等. 多端柔性直流输电系统的自适应下垂控制策略研究[J]. 电气技术, 2022, 23(5): 1-8.
- [13] 杨赞. 基于虚拟同步发电机的微网逆变器并网运行及无缝切换技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.

作者简介

崔杰(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力电子变换器研发设计工作。

武立国(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事风电变流器研究。

(收稿日期: 2022-09-21)