

高压大功率电网新型 MMC-STATCOM 结构 直流融冰装置研究

马冰¹, 陈忠华¹, 刘红恩², 杨慕紫¹, 付京³

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 中国电力科学院电力电子研究所, 北京 100192; 3. 国网辽宁省电力有限公司阜新供电公司, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 通过改进 MMC-STATCOM 结构可使其具有直流输出能力, 实现高压大功率电网的直流融冰功能。运用三相模块化多电平换流器(Modular Multi-level Converter, MMC)的公共直流端以及 MMC 各相之间能量能够相互流动的特点, 实现四象限运行, 且模块化的设计适合于高压、大功率的场合。应用耐压高, 驱动功率小的电子注入增强栅晶体管(Injection Enhanced Gate Transistor, IEGT)作为功率子模块的开关器件, 能够使装置容量得到更好的扩充, 实现大电流的直流融冰和大功率的无功补偿功能。静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)也为无功补偿提供更准确和快捷的补偿能力。最后利用 Matlab 等仿真软件搭建三相 MMC-STATCOM 结构融冰装置仿真模型进行模拟仿真, 结果证明此结构在电网中可稳定且快速地运行。

关键词: 模块化多电平换流器; 四象限运行; 直流融冰; 无功补偿; 电子注入增强栅晶体; 静止同步补偿器

Research of high voltage high power grid DC ice melting and static synchronous compensation device

MA Bing¹, CHEN Zhonghua¹, LIU Hongen², YANG Muzi¹, FU Jing³

(1. Department of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;
2. Power Electronics Research Institute of China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
3. Fuxin Power Supply Company of State Grid Liaoning Province Electric Power Company, Fuxin 123000, China)

Abstract: Improving the MMC - structure of STATCOM can make its have DC output ability and achieve the function of high voltage power grid DC ice-melting. Modular multi-level converter has a common DC side and energy can flow to each other between each MMC phase, with which four-quadrant operation is achieved, and it adopts modular design, which is very suitable for high-pressure and high-power situations. The power sub-module switching device, which takes new high power and low driving power turn-off devices Injection Enhanced Gate Transistor, can expand the capacity of the device and achieve high current DC ice-melting and high power compensation. Static Synchronous Compensator (STATCOM) also provides a more accurate and efficient ability to compensate for reactive power compensation. Three-phase MMC-STATCOM simulation models are built in the Matlab software, the theoretical analysis is verified by simulation that the proposed structure can be stable and run faster in the grid.

Key words: modular multi-level converter; four-quadrant operation; DC ice melting; reactive power compensation; injection enhanced gate transistor; static synchronous compensator

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)11-0101-08

0 引言

雨雪冰冻是影响电网输电线路安全运行的主要因素之一, 例如针对 2008 年初特大雨雪冰冻天气对湖南电网造成巨大损失的破坏性问题, 中国电力科

学研究院参与设计的 500 kV 复兴变电站直流融冰兼静止无功补偿(Static Var Compensation, SVC)装置是国家级实施的重要科技减灾项目^[1-2]。由该项目研制出的固定式直流融冰装置顺利通过试验并成功应用。如何更好地解决线路融冰和无功补偿问题, 提高设备利用率, 一直是值得深入研究的问题。

本文针对高压电网存在的实际问题, 引入

基金项目: 国家电网公司科技项目(DLHZ200813)

2001 年德国学者提出的模块化多电平换流器(MMC)结构的概念^[3-5], 将直流融冰与级联功率子模块链式结构 STATCOM^[6]动态无功补偿功能相结合, 提出了 MMC-STATCOM 新型直流融冰结构, 将两组相同的级联型 STATCOM 补偿器结构通过桥臂电感连接起来, 克服传统的变换器结构输出电压等级受限制的缺陷, 以及由故障或干扰造成桥臂瞬时开路或短路时易损坏等不足^[7], 不仅结构简单, 无需整流变压器或移相变压器, 而且操作便捷, 功能切换时无需切换拓扑结构, 可实现交流侧的多电平输出, 无谐波问题, 无需加装滤波器。大功率开关器件 IEGT 的并联使用, 使此结构不但满足直挂电网 10 kV 交流侧大功率无功补偿的电压条件, 同时满足直流侧输出 4 kA 以上大电流融冰的条件。由于 MMC-STATCOM 型融冰装置具有直流母线, 通过 IEGT 和多电平脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术, 可以快速地使电能从电网侧流向直流侧, 也可由直流侧回馈到电网侧, 同时对有功和无功进行快速独立的控制, 实现四象限运行。最后本文通过 Matlab 等系统仿真软件, 采用实际工程上的数值进行仿真实验, 对提出的结构和功能进行实验验证。证明此结构可稳定且快速地运行。

1 系统拓扑结构

1.1 开关器件的选择

系统的功率器件很大程度上决定装置的经济指标和效率。虽然 IGBT 的出现使电器设备在性能上迈了一大步, 但饱和压降过高, 阻断电压较低, 本文采用近年来出现的新型全控可关断器件—IEGT。IEGT 是耐压高达 4 kV 以上的全控型电力电子器件, 通过采取增强注入的结构来实现低通态电压, 非常适合应用于高压大电流场合, 应用范围要比 IGBT 宽泛的多。具有高阻断电压和低饱和压降的特点, 驱动功率仅为 IGBT 的四分之一左右, 大大增加节能方面的优势^[8]。与 IGBT 相比, IEGT 的驱动功率更小, 且能承受较高的 du/di 和 di/dt 。曾经在高压大功率电力系统中, 开关的工作频率由于受器件和技术的制约而不能过高, 但由于 IEGT 采用 MOS 栅极结构, 开通和关断散热性能优秀、损耗小的特点, 适当地增加开通和关断频率不仅不会造成明显的温度升高和电能传送能力的降低, 还能促进改善逆变器输出电压的谐波性能。所以 IEGT 能够作为高压大功率电网装置设计中的主电路开关器件。

1.2 MMC-STATCOM 型直流融冰结构

MMC-STATCOM 的每相桥臂均由多个功率子模块链接而成, 由于工作在大功率下, 单个开关器件不能满足电流要求, 考虑 IEGT 并联分流原理, 结构由 H 桥式模块衍生而来, 如图 1 所示, 先将两个带反并联二极管的 IEGT 串联形成串联组件, 再将三组串联组件和一个电容并联构成功率子模块, 通过控制 IEGT 的导通和关断来控制功率子模块在桥臂中的投切。 U_{in} 为子模块对电网的输出电压, 数值为 U_{in} 和 0; I_{in} 为电网注入模块的交流电流; i_d 为注入电容的直流电流; U_{dn} 为电容电压。系统对负荷的无功电流能够快速检测出来, 通过适当的 PWM 方式, 使子模块的输出电压进行阶次叠加产生多电平电压波形, 确保能够输出目标波形, 获得相对应的无功补偿电流。

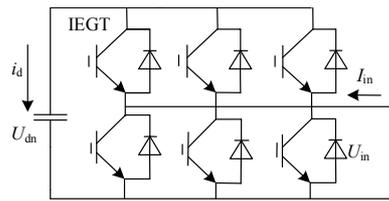


图 1 新型功率子模块结构图

Fig. 1 Structure of the new power module

MMC-STATCOM 直流融冰装置结合了电压源换流器的灵活性和链式结构的方便快捷等优点。系统拓扑结构如图 2 所示, 每相由上、下两个相同

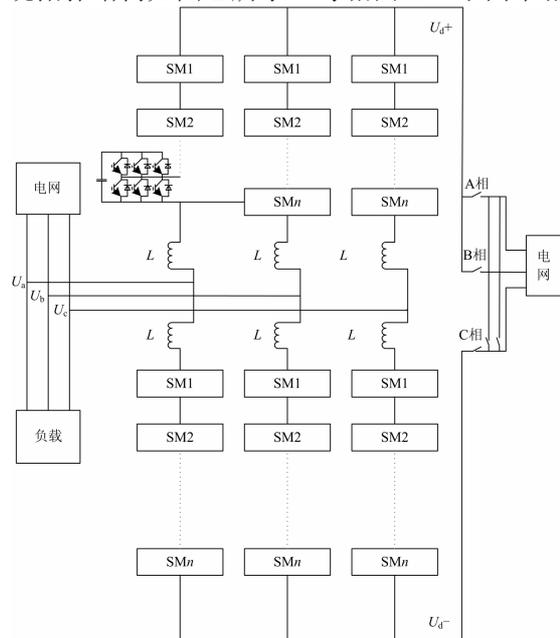


图 2 MMC-STATCOM 型直流融冰装置结构图

Fig. 2 Structure of MMC - STATCOM DC ice melting device

的桥臂构成, 单相桥臂由 N 个功率子模块和一个桥臂电感串联而成。每相上、下桥的所有 N 个功率模块, 整体结构类似于并联两台星接 STATCOM, 不同之处在于 MMC-STATCOM 引出中性点为直流输出端, 拥有交、直流公共母线, 能够同时传输有功功率和无功功率, 实现四象限运行。

MMC-STATCOM 型装置使多电平技术通过改进换流器本身的拓扑结构大大增加系统输出的功率。电平数越多, 每个开关器件所承受的压降越低, 谐波含量也就越低。通过系统控制使各相单元桥臂得到理想的桥臂电压, 就可以实现在装置的直流侧得到较大的直流融冰电压 U_d , 以及在交流侧得到期望的交流补偿电压 U_i 。

2 工作过程及控制原理

MMC 型结构等效电路原理如图 3 所示, 换流器交流侧输出端经过桥臂电感 L 与电网侧线路连接, U_a 、 U_b 、 U_c 为 MMC-STATCOM 输出的三相电压, N 为零点电位参考点, N_u 、 N_d 分别为上、下桥臂交流中性点。换流器由 A、B、C 三相组成, 每相通过桥臂 n 个子模块配合控制投切模拟正弦交流电压, 任意时刻投入的上、下桥臂子模块数均相等, 保持直流电压稳定。桥臂链接的子模块电容等效为可控电压源。

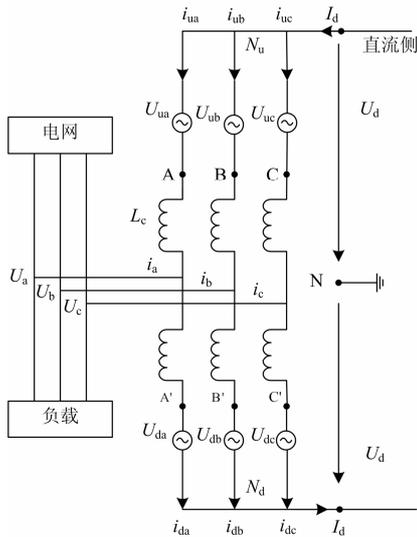


图 3 MMC 等效电路原理图

Fig. 3 Principle diagram of MMC equivalent circuit

由于桥臂电感上的压降相对较小, 所以忽略电感上的压降可以得出

$$u_{ui} + u_{di} = 2U_d \quad (1)$$

i 为 A、B、C, 又通过每相上下桥臂得

$$u_{ui} = U_d - u_i \quad (2)$$

$$u_{di} = U_d + u_i \quad (3)$$

由式(1)~式(3)可知, 只要通过对三相上、下桥臂施加的电压进行控制, 就可以在装置的交流侧得到期望的交流补偿电压 U_i , 以及在直流侧输出稳定的直流融冰电压 U_d 。装置的工作情况可分为两个方面, 即启动和运行, 运行方面包括融冰和无功补偿两大功能。

2.1 启动过程

启动装置首先要封锁所有功率子模块的触发脉冲, 以 A、B 相之间的桥臂子模块总电容充电过程为例说明 MMC 型装置充电原理。MMC 型装置充电电路实际上工作原理等同 RLC 电路, 如图 4 所示, A、B 相线电压正、负半波充电回路参数相同, 充电电容由于二极管的存在, 其电压值被逐渐抬高。最大充电电流值 I_{MAX} 会在 u_{ab} 的第一个周期内出现, 有

$$I_{MAX} = \frac{\sqrt{2}U_i}{\sqrt{\left(\frac{R_{d1}}{2}\right)^2 + X^2}} \quad (4)$$

式中: U_i 为网侧线电压有效值; L 为 MMC 交流侧等效电感; L_0 为桥臂电感。

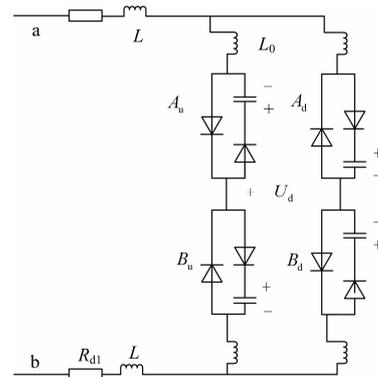


图 4 MMC 型装置 A、B 相间充电原理图

Fig. 4 Principle diagram of charging loop between phase A and phase B of MMC

$$X = \omega_0(2L + L_0) - \frac{1}{2\omega_0 C_0}$$

解出

$$R_{d1} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2U_i^2}{I_{MAX}^2} - X^2} \quad (5)$$

根据式(5)给定最大充电电流峰值, 计算出 MMC 装置交流侧限流电阻。充电电流峰值 I_{MAX} 需要综合考虑 MMC-STATCOM 装置、桥臂电感以及网侧变压器等的额定电流参数和电网的容量。最终,

直流侧电压能够输出的峰值为 $\sqrt{2}U_i$ ，功率子模块充电电容能够达到的峰值电压为 $\frac{\sqrt{2}U_i}{n}$ 。

启动阶段，交流侧三相线电压的幅值也就等于直流侧输出的融冰电压能够达到的最大值，由于此融冰电压最大值没有达到直流电压额定值，所以必须要通过控制器的作用，继续使充电电容充电，最终得到额定直流电压。系统采用双闭环控制器^[9-13]控制直流电流的方式，内环通过电流负反馈完成高品质的交流电流响应，外环通过电压负反馈提供高品质的交流电压输出。

2.2 运行过程

2.2.1 融冰功能

直流融冰的工作过程就是功率子模块在直流侧的放电过程，通过较高的直流电流，实现电能与热能的转换，使得导线发热，覆冰融化。以 A 相桥臂电路为例，通过对上、下桥臂的交流中性点 N_u 和 N_d 的直流偏移电位的调整，实现直流电压输出可控化。交流侧和直流侧的输出电压都是由每个功率子模块的电容电压叠加而成，同一相相内每个子模块的工作情况均相同。如图 3 所示， N_u 和 N_d 的直流电位偏移是串联模块输出电压叠加的结果，因而每个功率子模块的输出中同时含有交流分量和直流分量。子模块输出电压的直流分量通过 PWM 技术来实现。同时叠加幅值为 U_{di} 和 $-U_{di}$ 的直流电压分量向 A 相上、下桥臂的子模块，上、下桥臂的输出电压为各自桥臂 n 个链式子模块输出电压的总和，其输出电压表达式为

上桥臂：

$$u_{aN_u} = N(U_{au} \sin \omega t + U_{di}) \quad (6)$$

下桥臂：

$$u_{aN_d} = N(U_{ad} \sin \omega t - U_{di}) \quad (7)$$

式中， U_{au} 和 U_{ad} 分别为 A 相上、下桥臂一个子模块单元交流输出电压的幅值。将稳定的直流电压注入到某一相或两相输电线路中，控制较大幅值的直流电流产生持续的热能完成融冰工作。

2.2.2 无功补偿功能

系统启动完成后，对输电线路的无功补偿功能可通过电流直接控制来实现。此时系统的 MMC-STATCOM 结构可被视为与网侧同频率的幅值和相位均可控制的交流电压源。通过直接控制该等效电压源的交流侧的输出电流，采用 PWM 脉宽调制技术对功率器件进行调制触发，使其产生对网侧所需补偿的适量的无功电流，完成动态无功补偿功能。

由于功率器件开关损耗和线路损耗的存在，为保证装置正常工作，需要从交流系统中吸收少量的有功功率以补偿装置的各种损耗，保持直流侧储能元件稳定。

δ 为 MMC-STATCOM 交流侧输出电压 \dot{U}_M 与网侧电压 \dot{U}_i 的相位差，当网侧电压 \dot{U}_i 滞后 MMC-STATCOM 交流侧输出电压 \dot{U}_M 时， δ 为正值， φ 为电抗器阻抗角。虽然输出电压 \dot{U}_M 与输出电流 \dot{I} 仍相差 90° ，但网侧电压 \dot{U}_i 比电流 \dot{I} 的相位差减小了 δ° 。所以系统需要输出电流 \dot{I} 中含有的有功分量提供有功功率来补充 MMC-STATCOM 的损耗。当网侧电压 \dot{U}_i 滞后于交流的输出电压 \dot{U}_M ($\delta > 0$) 时，MMC-STATCOM 吸收感性无功功率，如图 5(a) 所示，当网侧电压 \dot{U}_i 超前于交流的输出电压 \dot{U}_M ($\delta < 0$) 时，MMC-STATCOM 吸收容性无功功率，如图 5(b) 所示。所以改变输出电压 \dot{U}_M 的幅值和与网侧电压 \dot{U}_i 的相位差 δ ，即可控制改变电流 \dot{I} 的相位和大小，使电网中的无功功率得到补偿。MMC-STATCOM 从系统中吸收的无功功率为

$$Q = \frac{3U_i^2}{2R} \sin 2\delta \quad (8)$$

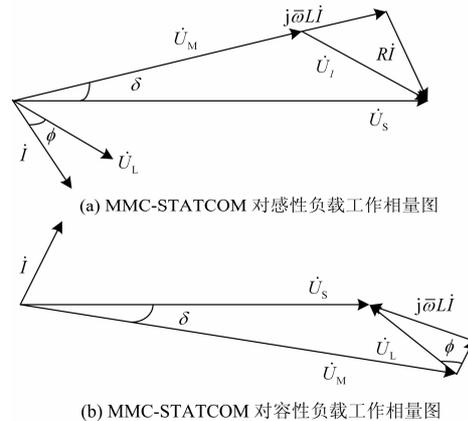


图 5 MMC-STATCOM 工作相量图

Fig. 5 Working phasor diagram of MMC-STATCOM

通过控制输出电压来实现交流侧输出电流幅值和相位的变化。三相 MMC-STATCOM 的平均值为

$$\frac{1}{2}L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{1}{2}R \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} - \frac{1}{2} \begin{pmatrix} U_{ua} - U_{da} \\ U_{ub} - U_{db} \\ U_{uc} - U_{dc} \end{pmatrix} \quad (9)$$

由三相坐标系下公式可以得到同步旋转坐标系下 $d-q$ 计算公式为

$$\frac{1}{2}L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \frac{1}{2}\omega L \begin{pmatrix} -i_q \\ i_d \end{pmatrix} + \frac{1}{2}R \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{id} - \frac{1}{2}(U_{ud} - U_{dd}) \\ U_{iq} - \frac{1}{2}(U_{uq} - U_{dq}) \end{pmatrix} \quad (10)$$

将电网侧输入电压也从三相坐标系变换成同步旋转坐标系下得

$$\begin{pmatrix} U_{id} \\ U_{iq} \end{pmatrix} = T_{3/2} \begin{pmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}U_i \\ 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中, 变换矩阵

$$T_{3/2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (12)$$

瞬时有功功率和无功功率为

$$P_i = U_{id}i_d = \sqrt{3}U_i i_d \quad (13)$$

$$Q_i = U_{id}i_q = \sqrt{3}U_i i_q \quad (14)$$

由式(13)、式(14)可知, 对电网功率的有功和无功的独立控制可通过对 MMC-STATCOM 的 i_d 、 i_q 的调节来实现。本文为了保证系统控制的响应速度和精度, 采用动态响应控制最迅速的电流直接控制法, 对 MMC-STATCOM 的控制如图 6 所示, Q 为系统进入无功补偿阶段指令; U_{cref} 为直流参考电压; U_{ci} 为单个功率子模块电压; $i_{d,r}$ 为在有功电流参考分量上叠加的直流调节分量。开关电路由通过电流控制环节调节后的信号 U_{Ni} 进入比较环节之后生成, 附加驱动脉冲即可控制 MMC-STATCOM 无功补偿工作。

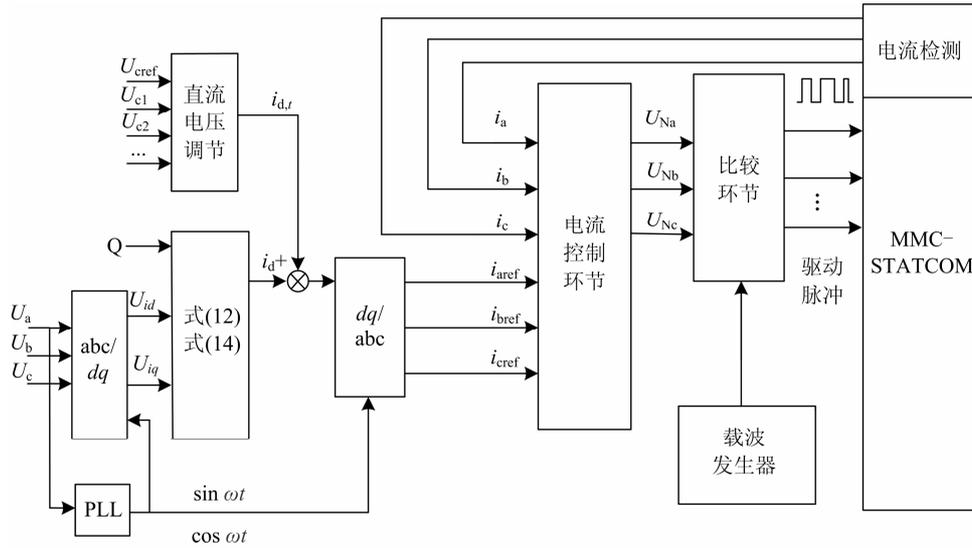


图 6 无功补偿控制框图

Fig. 6 Block diagram of the control system for reactive power compensation

3 系统仿真

为了验证 MMC-STATCOM 型直流融冰装置的功能, 搭建基于 Matlab 的典型三相线路的数字仿真模型^[14-16]。系统主电路由三相电压源和三相负载、电抗器和多组功率子模块组成, 系统参数见表 1。在系统仿真中, 对装置的几个动态响应过程进行综合分析, 通过仿真波形来验证此系统结构与功能上的优越性。本文主要对前文所述的启动过程, 以及融冰和无功补偿功能运行过程的响应波形进行分析。

表 1 系统参数表

Table 1 Parameters of system

系统参数	数值
直流输出电压	0~20 kV
直流输出电流	0~4 kA
子模块电容	9 000 μF
单相子模块数量	20
单相单桥臂子模块数量	10(无冗余)
桥臂电感	10 mH
电网侧相电压	10.5 kV
装机容量	100 MVA

装置的启动过程以直流侧的电压输出波形为跟踪响应。由图 7 可知，应用限流电阻使直流侧的电压输出波形无明显过冲。充电过程中电压虽有波动，但由于闭环控制的存在，使得电压能通过比较很快跟踪参考值，最终稳定在额定值。每一相通过上、下桥臂所有子模块的同时工作既能满足交流侧 10 kV 电网无功补偿容量要求，又能满足直流侧大功率直流融冰所须的电压抬高要求。

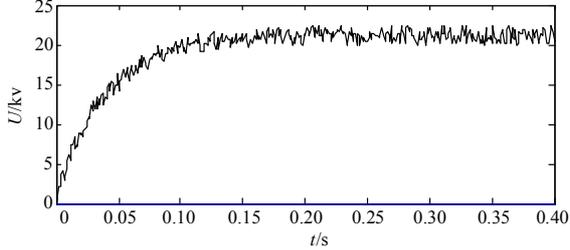


图 7 启动过程直流电压响应

Fig. 7 DC voltage during startup response

装置融冰功能实现的好坏可根据直流侧输出电压和某一单相线路输出的融冰电流的波形来验证。图 8 为融冰阶段电压波形，可以看出直流电压始终保持在参考值 20 kV 附近波动，最大波动幅度不大于 3%，稳定的电压是提供 4 kA 以上大功率稳定电流的基础。对 A、B、C 三相输电线路进行单相独立融冰，图 9 为系统直流侧为 A 相线路提供融冰电流的响应图，其他两相线路融冰时电流波形与 A 相基本相同，从图中可知，经过短暂的波动后，线路上的融冰电流稳定在额定电流附近，能够有效地快速融冰。

STATCOM 补偿功能反映在电网侧电流、电

压相位的调节上。图 10 为 STATCOM 运行在感性状态，将网侧电流、网侧电压和 STATCOM 补偿电流通过同一时序的波形叠加，更直观地看出相位关系以进行深入分析。在 STATCOM 未工作时系统为容性负载，0.1 s 时刻，STATCOM 通过控制器投入运行。从仿真波形可见，在 STATCOM 未工作时，网侧电流超前于网侧电压并且电流幅值较大，STATCOM 运行后，网侧电流幅值减小为原来的 1/2 左右，并且电流相位与网侧电压相位完全同相，说明系统中的无功功率完全被补偿。从 0.1 s 时刻以后的波形变化可以看出 STATCOM 的响应非常迅速，补偿工作大约在 10 ms 内完成。

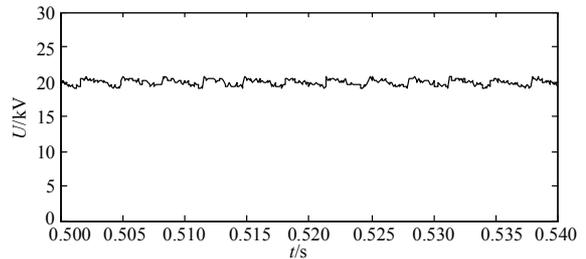


图 8 直流电压输出波形

Fig. 8 DC voltage output waveform

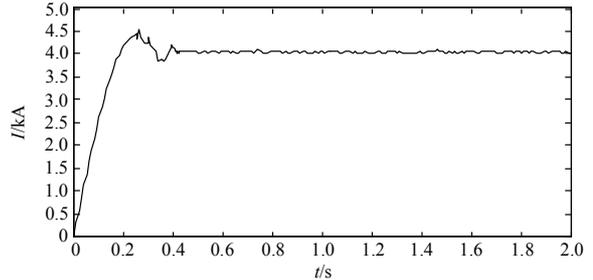


图 9 A 相线路输出电流响应

Fig. 9 A phase line output current response

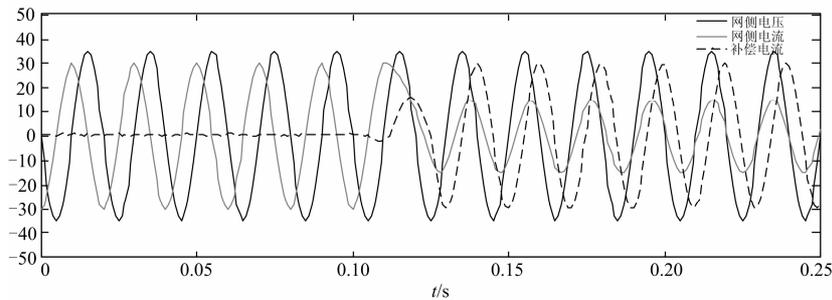


图 10 感性负载无功功能响应时序图

Fig. 10 Timing diagram of inductive load reactive functional response

图 11 为负载发生突变时 STATCOM 的响应过程时序图，仿真中模拟负载的变化情况：在 0~0.04 s 时间内，系统空载，电网电流为零；在 0.04~0.18 s 时间内，系统负荷呈容性；在 0.18~0.22

s 时间内，负荷全部退出，系统处于空载状态；在 0.22~0.3 s 时间内，系统中投入感性负荷。该响应波形综合反映了对于突变负载 STATCOM 的动态补偿性能，在 0.1 s 时刻，STATCOM 启动迅

速补偿系统中的容性无功电流, 使系统电流完全转化为有功电流且与网侧电压相位相同; 在 0.18 s 时刻, 系统中负荷全部退出, STATCOM 处于空载运行状态; 0.22 s 时刻, STATCOM 立即处于容

性运行状态, 补偿系统中的感性无功电流。通过仿真波形, 验证了该控制系统具有较高的响应速度和较强的精度。

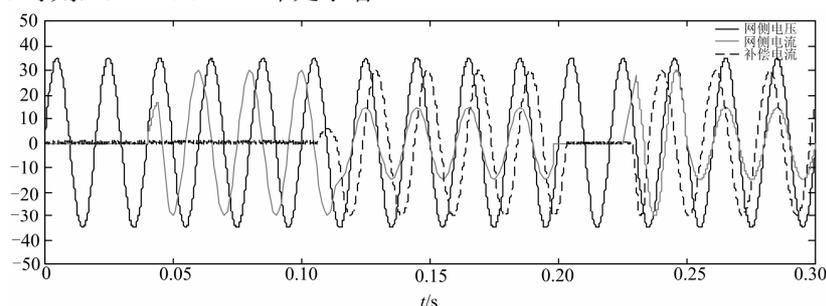


图 11 突变负载无功功能响应时序图

Fig. 11 Timing diagram of mutation load reactive functional response

4 结论

通过对新型 MMC-STATCOM 结构融冰装置的运行仿真波形分析, 得出结论: 应用大功率可关断器件 IEGT 为核心的开关模块, 能够更快捷平滑地实现大功率输电线路的开通和关断; 系统的 MMC 结构有效地提高变电站的动态电压协调能力, 实现四象限运行, 谐波畸变小, 避免谐波污染, 很大程度上提高直流融冰设备的利用率且通过抬高电压的方式能够得到稳定的 4 kA 以上融冰电流; STATCOM 的运行对网侧无功的补偿非常迅速, 动态响应良好, MMC-STATCOM 结构能够满足大功率电网的运行条件。装置无论是在结构还是功能上都要比多重化整流器型融冰装置优异, 所以模块化结构是更好地解决大功率电网问题的方向, 在高压或特高压电网运行中, 新型 MMC-STATCOM 结构融冰装置将会有更广阔的发展空间。

参考文献

- [1] 张文亮, 于永清, 宿志一, 等. 湖南电网 2008 年冰雪灾害调研分析[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 1-6.
ZHANG Wenliang, YU Yongqing, SU Zhiyi, et al. Investigation and analysis of icing and snowing disaster happened in Hunan Power Grid in 2008[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 1-6.
- [2] 谢彬, 洪文国, 熊志荣, 等. 500 kV 复兴变电站固定式直流融冰兼 SVC 试点工程的设计[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 182-185.
XIE Bin, HONG Wenguo, XIONG Zhirong, et al. Pilot project design of concurrent fixed DC ice-melting and SVC for 500 kV Fuxing substation[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 182-185.
- [3] 王珊珊, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平电压源换流器的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 1-8.
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Modeling of modular multi-level voltage source converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 1-8.
- [4] 杨晓峰, 王晓鹏, 范文宝, 等. 模块组合多电平变换器的环流模型[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 21-27.
YANG Xiaofeng, WANG Xiaopeng, FAN Wenbao, et al. Circulating current model of modular multilevel converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 21-27.
- [5] 杨晓峰, 孙浩, 支刚, 等. 双星型模块组合型多电平变换器的 PWM 控制策略[J]. 电力电子, 2010, 25(2): 14-19.
YANG Xiaofeng, SUN Hao, ZHI Gang, et al. PWM control strategies of double star-connected modular multilevel converter[J]. Power Electronics, 2010, 25(2): 14-19.
- [6] 朱劲松, 李磊. 基于模块化多电平换流器的 STATCOM 分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 113-117.
ZHU Jingsong, LI Lei. Analysis and control of STATCOM based on modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 113-117.
- [7] 姜建国, 滕达, 林川. 级联 H 桥型静止同步补偿器控制方法仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(1): 98-102.
JIANG Jianguo, TENG Da, LIN Chuan. Simulation

- analysis of control method in cascade H-bridge static synchronous compensator[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(1): 98-102.
- [8] 刘文华, 刘炳. IEGT-适用于 STATCOM 的新型大功率开关器件[J]. 电力电子技术, 2001, 35(4): 45-50.
LIU Wenhua, LIU Bing. IEGT-a new power component suitable for STATCOM[J]. Power Electronics, 2001, 35(4): 45-50.
- [9] 杨旭, 王兆安. 一种新的准固定频率滞环 PWM 电流控制方法[J]. 电工技术学报, 2003, 18(3): 24-28.
YANG Xu, WANG Zhaoan. A novel quasi-constant hysteretic PWM current mode control approach[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(3): 24-28.
- [10] 荣飞, 罗安, 范卿. 应用于小平衡系统的 STATCOM 电控制新方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 138-143.
RONG Fei, LUO An, FAN Qing. A novel voltage control method applied in STATCOM under unbalanced system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 138-143.
- [11] 徐永海, 刘晓博. 考虑指令电流的变环宽准恒频电流滞环控制方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 90-95.
XU Yonghai, LIU Xiaobo. A variable hysteresis-band and quasi-constant current controller with reference current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 90-95.
- [12] 贾勇, 何正友. 基于受扰轨迹的低频振荡分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 140-148.
JIA Yong, HE Zhengyou. Review on analysis methods for low frequency oscillations based on disturbed trajectories[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 140-148.
- [13] 刘亮, 邓名高, 欧阳红林. D-STATCOM 自适应检测算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 115-119.
LIU Liang, DENG Mingguo, OUYANG Honglin. A research of adaptive detection algorithm for D-STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 115-119.
- [14] 杨帆, 赵书强. 智能电网的发展对大电网可靠性评估的影响[J]. 电网与清洁能源, 2015, 29(10): 24-30.
YANG Fan, ZHAO Shuqiang. Impact of smart grid development on composite power system reliability evaluation[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 29(10): 24-30.
- [15] 郭培育, 邵能灵. 六序分量补偿的同杆双回线接地电抗继电器[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(2): 27-31.
GUO Peiyu, TAI Nengling. Ground-fault relay compensated by six-sequence components for double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(2): 27-31.
- [16] 文艺, 李淳. 一种特高压交流输电线路冲击电晕的改进模型[J]. 高压电器, 2015, 51(2): 63-72.
WEN Yi, LI Chun. Improved model of impulse corona on ultra high voltage alternating current transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2): 63-72.

收稿日期: 2014-09-04; 修回日期: 2014-10-09

作者简介:

马冰(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电系统研究; E-mail: cc20081989@126.com

陈忠华(1965-), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制, 高压直流输电;

刘红恩(1986-), 男, 工程师, 研究方向为电力电子与电力传动。

(编辑 周金梅)