第 49 卷 第 1 期：248-260 高电压技术 Vol.49, No.1: 248-260
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211609

基于模块化多电平矩阵变换器的低频输电系统柔性启停策略

陆立文[1]，吴小丹[1]，邱德锋[1]，董云龙[1]，裘　鹏[2]，倪晓军[2]
（1. 南京南瑞继保电气有限公司，南京 211102；2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院，杭州 310014）

摘　要：基于模块化多电平矩阵变换器(M3C)的低频输电系统(LFTS)因其无需建设海上换流站，在中远海上风电送出方案中具有巨大的应用潜力，但目前尚未有文献对 LFTS 的启停控制深入研究。为了实现低频线路开关在无电压及无电流状态下分合控制的目的，采用了一种柔性启停策略，包括一种无同期的启动策略和一种无电压电流分开关的停运策略。以双端 LFTS 为分析对象，通过对 M3C 的灵活控制和启停逻辑的合理设计，无需新增控制装置及检同期的控制策略，可解决 LFTS 启停时易出现的过压及过流问题。仿真实验结果和结论表明了所提控制策略的正确性，各换流站之间实现完全柔性启停，具有良好的 LFTS 工程应用前景。

关键词：低频输电；模块化多电平矩阵变换器；柔性启停策略；无同期；无电压电流；涌流

Flexible Startup and Shutdown Strategy of Low Frequency Transmission System Based on Modular Multilevel Matrix Converter

LU Liwen[1], WU Xiaodan[1], QIU Defeng[1], DONG Yunlong[1], QIU Peng[2], NI Xiaojun[2]
(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract：Low frequency transmission system(LFTS) based on modular multilevel matrix converter(M3C) has great application potential in medium or long-distance offshore wind power transmission scheme because it does not need to build offshore converter stations. At present, the literature of deeply studying the startup and shutdown control strategy of LFTS is not available. In order to open and close the low-frequency line switches under no voltage or current during the startup and shutdown of LFTS, a flexible startup and shutdown strategy of LFTS is proposed, which contains a startup strategy without detecting switch synchronization and a shutdown strategy for disconnecting switches under the condition of no voltage or current. The double-ended LFTS is taken as an example, a flexible control method is applied in M3C, and a reasonable startup and shutdown strategy is designed. It is found that, without additional control devices and detecting switch synchronization, the over voltage and over current problems can be solved during the startup and shutdown of LFTS. The simulation results show that the flexible startup and shutdown between converter stations can be realized with the proposed control strategy. Also the proposed strategy is correct and the engineering application of LFTS has great prospects.

Key words：low frequency transmission; modular multilevel matrix converter; flexible startup and shutdown strategy; without detecting the synchronization of switches; no voltage or current; inrush current

0　引言

基于全桥模块化多电平矩阵变换器(modular multilevel matrix converter，M3C)的低频输电系统(low frequency transmission system，LFTS)，通过 M3C 将工频交流电变换为低频交流电传输的方式来提高输电效率，在中远海上风电送出方案中，因为其无需建设海上换流站的成本优势而具有较高的竞争力[1-3]。虽然 LFTS 应用潜力巨大，但是目前基于 M3C 低频输电技术的实际投入运行工程，国内外尚无报道，仍需要对其应用进行具体化、细化研究。

目前有关 LFTS 的研究，多聚焦于稳态运行控制方面以及故障条件下的穿越控制的研究，如文献[4-5]对 M3C 进行了参数分析,研究了基于 M3C 的低频输电系统的稳态控制策略。文献[6-9]为了保证所有桥臂功率模块电容电压的稳定和功率的有效送

基金资助项目：国网浙江省电力有限公司科技项目(2021ZK07)。
Project supported by the Research & Development Project of State Grid Zhejiang Electric Power Supply Co., Ltd.(2021ZK07).

出，采用了在静止坐标系下对所有桥臂的工、低频分量进行控制的方法。文献[10]对变换器桥臂故障时故障电流的特性进行了详细的分析，并且提出了识别故障的建议及故障电流的抑制方法。以上文献都是针对 LFTS 稳态运行的研究，对于启动和停运策略，尚未见相关文献研究提及。LFTS 工程应用中，启动和停运策略必不可少，合理的策略才能保证系统设备安全以及接下来的稳定运行。为此，本文提出了一种用于成套 LFTS 无线路同期合闸的柔性启停策略。

在成套 LFTS 启动前，将待启动站低频线路侧断路器分开，分别启动两个换流站且控制低频侧零电压，在两个换流站的工频侧各自通过注入正负序电流[11]，将本换流站的子模块电容电压控制至额定值。低频线路开关在零电压及零电流情况下合闸，换流站低频侧并网过程无需检同期。再由定低频电压站缓慢建立低频电压，以防止线路和低频换流变充电电流过大。最后，定功率站按照指令升降功率，从而完成启动过程。在 LFTS 停运时，提出一种无电压电流分开关的停运策略。定功率站将系统传输功率降到零后，定电压站控制低频侧交流电压到零，再分开低频线路开关，最后各换流站实现无电压无电流的柔性停运。整个启动和停运过程中，低频线路开关分合都在零电压零电流下进行，换流站之间无电压电流冲击，实现柔性启停，保证了 LFTS 的设备安全以及接下来的稳定运行。同时，该策略也可用于低频侧断开 M3C 作 3 个并联 STATCOM 运行的控制方案，因此，所提策略具有良好的工程应用价值。

1 LFTS 结构及工作原理

LFTS 典型结构如图 1 所示，低频换流站 1 将电网 S1 的工频交流电通过工频变压器 T11 接入到 M3C 换流器，通过交交变频变换成低频交流电，低频交流电通过低频变压器 T12 接入到低频线路，再由低频线路传输到低频换流站 2，低频换流站 2 的 M3C 换流器通过该站低频变压器 T22 接收到低频交流电后，通过交交变频变换成工频交流电，再由工频变压器 T21 接入到工频交流电网 S2，实现低频输电系统的组网及功率控制[12]。

其中 QF11、QF21 分别为站 1 和站 2 工频侧开关；QF12、QF22 分别为站 1 和站 2 低频线路侧开关。各 M3C 换流器由 3 个星型子换流器并接而成，在低频侧线路开关断开或低频侧无压时，各子换流器也可以视为星形链式静止同步补偿器 STATCOM[13-15]。根据 M3C 的双 $\alpha\beta$ 数学模型，在对 M3C 的工频侧控制进行分析时，可以图 2(a)工频子换流器为单个分析对象；而在对 M3C 的低频侧控制进行分析时，可以图 2(b)低频子换流器为单个分析对象；图 2(a)和图 2(b)为同一个电路拓扑，只是桥臂 xy(x=a,b,c; y=u,v,w)的布置位置不同。u_{sa}、u_{sb}、u_{sc}为工频侧三相电压；u_{lfu}、u_{lfv}、u_{lfw}为低频侧三相电压。其中每个桥臂由桥臂电抗器 L 与多个全桥子模块(sub-module，SM)串联组成。

正常运行时，在合理控制的作用下，工、低频之间电能可以有效转换，且工频侧电流不会流入到低频侧，而低频侧电流也不会流入到工频侧，即可以在工、低频之间实现功率的完全解耦控制。具体控制方式是 M3C 换流器的工、低频侧电气量转换到 dq 坐标系下进行正序分量和负序分量独立控制，把生成的控制量再变换成 abc 坐标系下的电压分



图 1 低频输电系统

Fig.1 Low frequency transmission system

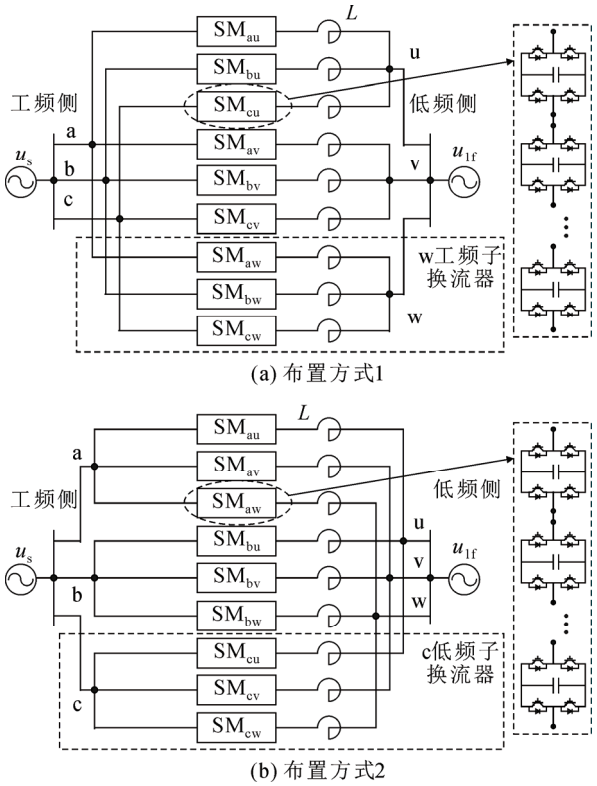


图 2 M3C 换流器

Fig.2 M3C converter

量，最后将 abc 坐标系下电压分量叠加，形成换流器各个桥臂的调制信号[16]。

由于 LFTS 在启动前，低频侧处于无压状态，且成套系统的所有功率均需通过工频交流系统进行最终的交互。为此，在实现 LFTS 组网及功率控制的启动阶段，通过控制各换流站的 M3C 和工频交流系统进行功率交互实现桥臂电容电压的稳定控制。对于两个换流站的工频侧，对 M3C 的各子换流器，在 *dq* 旋转坐标系统下，正序 *d* 轴分量用来控制整个子换流器电容电压的总和，正序 *q* 轴分量用来控制与交流电网交换的无功。工频负序 *dq* 轴分量用来均衡子换流器的相间电容电压，其他两个子换流器分析类似。

对于两个换流站的低频侧，类似多端柔直的控制方式[17-18]，其中一个站为定低频交流电压控制，通过自产低频条件下的锁相环建立和稳定低频交流系统电压，称为 VF 站。另一个站用于控制低频侧的有功功率和无功功率，称为 PQ 站，如图 1 所示。VF 站的低频侧正序 *d* 轴分量用来控制交流电压幅值，正序 *q* 轴分量以及负序 *dq* 分量轴都控制为 0。PQ 站的低频侧正序 *d* 轴分量用来控制低频侧的有功功率，正序 *q* 轴分量用来控制低频侧的无功功率，而负序 *dq* 轴分量都控制为零[16]。LFTS 启动前和柔性直流输电的模块化多电平换流器(modular multi-level converter，MMC)类似，需通过不可控充电或者可控充电的方式将换流器的子模块电压控制到额定值。而在系统停运时，需将成套系统降低到零功率后再依次停运各个换流站等。

在该控制策略下，可以实现较为稳定的低频系统潮流控制。然而，LFTS 系统的启动与柔性直流输电系统不同，经过 M3C 变换后的电能为低频交流电，启动时不能像直流输电那样，直接合低频开关来连接两站进行输电，需要检测线路开关 QF12 和 QF22 两侧低频系统的电压、频率及相位，即通过检同期来实现两站间低频线路的连接。该控制策略增加了系统成本、站间通讯以及控制的复杂程度，且容易在同期合开关过程产生过压过流问题，影响设备安全稳定运行[19]，因此有必要研究无同期下的启动策略，促进低频输电的工程化应用。除此之外，建立电压时的涌流不一样。M3C 换流站建立低频电压需要考虑对低频变压器和低频线路的冲击，但直流输电换流站建立直流电压只需要考虑对直流线路的冲击。同时有必要优化低频输电系统的停运策略，在停运时合理的泄放线路能量，实现低频线路在零电压和零电流状态下分线路开关，最终达到低频输电系统柔性起停的目的。

2 LFTS 启停策略

2.1 启动策略

为了取消 LFTS 启动时线路开关 QF12 和 QF22 的检同期装置和控制算法，本文提出一种无同期启动策略，无需新增装置，实现 LFTS 柔性启动。柔性启动的判据为两点：一点是各个 M3C 换流站接入到低频线路阶段，在零电压条件下合上低频线路开关，无电压电流冲击。另一点是建立低频电压期间，线路三相电流始终保持零。整体通过对换流器的灵活控制完成，所提策略的具体实现步骤如下：首先，断开低频线路开关 QF12 和 QF22，使得站 1 和站 2 电气隔离，互不影响。

第 2 步，各换流站的 M3C 切换到 STATCOM 运行模式。在该模式下，换流器只和工频侧交换功率。然后分别控制各换流站合上工频电网侧开关 QF11 和 QF21，站 1 和站 2 单独充电后解锁。通过对 u、v、w 子换流器工频侧的完全独立控制，使得各子换流器的功率模组电容电压达到额定值，同时控制各子换流器低频侧零电压。以图 2(a)中 w 工频子换流器分析 M3C 在 STATCOM 模式下的工作原理，w 子换流器如图 3 所示。

对 w 子换流器，建立回路方程组为

$$\begin{cases} u_{\mathrm{sa}} = Ri_{\mathrm{saw}} + L\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{saw}}}{\mathrm{d}t} + u_{\mathrm{aw}} + u_{\mathrm{lfw}} \\ u_{\mathrm{sb}} = Ri_{\mathrm{sbw}} + L\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{sbw}}}{\mathrm{d}t} + u_{\mathrm{bw}} + u_{\mathrm{lfw}} \\ u_{\mathrm{sc}} = Ri_{\mathrm{scw}} + L\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{scw}}}{\mathrm{d}t} + u_{\mathrm{cw}} + u_{\mathrm{lfw}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：i_{saw}、i_{sbw}、i_{scw} 分别为 w 子换流器工频侧流入电流；R 和 L 分别为桥臂电抗器的电阻值和电感值；u_{aw}、u_{bw}、u_{cw} 为桥臂 aw、bw、cw 输出的交流电压；u_{lfw} 为低频侧 w 点电压。此时线路开关 QF12 和 QF22 断开，无其他站输入低频电压 u_{lfw}。

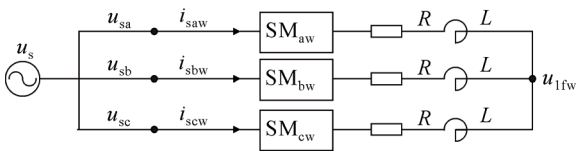


图 3 w 子换流器

Fig.3 The w sub-converter

由于工频侧采用正负序电流控制来使得各个桥臂子模块电容电压达到额定值，则在工频侧非故障状态下，子换流器桥臂中只存在正序和负序的电压电流，且三相正序和等于零，三相负序和也等于零，即

$$\begin{cases}0=(u_{sa+}+u_{sb+}+u_{sc+})+(u_{sa-}+u_{sb-}+u_{sc-})\\0=(i_{saw+}+i_{sbw+}+i_{scw+})+(i_{saw-}+i_{sbw-}+i_{scw-})\\0=(u_{aw+}+u_{bw+}+u_{cw+})+(u_{aw-}+u_{bw-}+u_{cw-})\end{cases}\quad(2)$$

式中：u_{sa+}、u_{sb+}、u_{sc+}和 u_{sa-}、u_{sb-}、u_{sc-}为工频侧三相电压的正负序分量；i_{saw+}、i_{sbw+}、i_{scw+}和 i_{saw-}、i_{sbw-}、i_{scw-}为 w 子换流器工频侧电流正负序分量；u_{aw+}、u_{bw+}、u_{cw+}和 u_{aw-}、u_{bw-}、u_{cw-}为桥臂 aw、bw、cw 输出交流电压的正负序分量，将式(2)代入到式(1)可得低频侧 w 点电压 u_{lfw}=0，同理可得其它两个工频子换流器低频侧 u 点和 v 点电压，u_{lfu}=u_{lfv}=0。则在单站 STATCOM 运行模式时，低频侧零电压，以确保低频变压器 T12 和 T22、开关 QF12 和 QF22 对地电压都为零。

为了使各个桥臂电容电压平均值达到额定值，在各个换流站以 STATCOM 方式解锁运行后，可以在分频分层功率平衡控制[16]基础上简化成两层控制，同样以图 3 单个工频子换流器为对象进行分析，其中 u_{lfw}=0。第 1 层控制子换流器工频正序电流来充电所有工频子换流器电容电压平均值到额定值 U_{Cref}，第 2 层控制工频子换流器工频负序电流来均相间电容电压平均值，基于 *dq* 旋转坐标系统的控制框图见图 4。

U_{Cref}、$U_{Cavg,w}$ 分别为图 3 中子换流器所有桥臂电容电压平均值的控制目标值和实际值；Q_{ref}、U_{ref}、Q、U 分别为图 3 子换流器与工频侧电网无功参考值、交流电压幅值参考值、无功实际值、交流电压实际幅值，在启动时无功参考值 Q_{ref} 可以设置为 0。$U_{Cavg,aw}$、$U_{Cavg,bw}$、$U_{Cavg,cw}$ 分别为图 3 子换流器各个桥臂电容电压平均值；i_{dwref+}、i_{qwref+}、i_{dwref-}、i_{qwref-}分别为工频侧注入图 3 子换流器电流的正序 *d* 轴、正序 *q* 轴、负序 *d* 轴及负序 *q* 轴分量参考值；i_{dw+}、i_{qw+}、i_{dw-}、i_{qw-}分别为工频侧注入图 3 子换流器电流的正序 *d* 轴、正序 *q* 轴、负序 *d* 轴及负序 *q* 轴分量；PI 为比例积分控制器；ω_s 为工频系统角频率；u_{sd+}、u_{sq+}、u_{sd-}、u_{sq-}分别为工频侧电网电压正序 *d* 轴、正序 *q* 轴、负序 *d* 轴及负序 *q* 轴分量；$\theta_{pll,s}$ 为 M3C 工频侧正序电压锁相环输出角度；$u_{awref+,s}$、$u_{bwref+,s}$、$u_{cwref+,s}$ 和 $u_{awref-,s}$、$u_{bwref-,s}$、$u_{cwref-,s}$ 以及 $u_{awref,s}$、$u_{bwref,s}$、$u_{cwref,s}$ 分别为图 3 子换流器工频侧正序控制器生成的调制波、负序控制器生成的调制波、以及最终整个工频侧控制器生成的总调制波；同理可以生成 M3C 另外两个 u 和 v 子换流器的总调制波 $u_{auref,s}$、$u_{buref,s}$、$u_{curef,s}$ 和 $u_{avref,s}$、$u_{bvref,s}$、$u_{cvref,s}$。

换流站以 STATCOM 方式单独解锁运行，此时若有故障，M3C 控制保护系统将进线开关 QF11 和 QF21 断开，可以终止给子模块电容充电，不影响其它站解锁充电，减小了对低频输电系统的冲击。

第 3 步，合上低频线路开关 QF12 和 QF22。由于 2 个 M3C 以 STATCOM 方式解锁运行，子换流器低频侧为零电压。因此，低频线路开关 QF12 和 QF22 可以零电压合闸，无需检同期，且可以实现换流站的无电压电流冲击并网，满足柔性启动的判据之一，在零电压条件下合上低频线路开关。

第 4 步，其中一个站由 STATCOM 模式切换为 VF 模式且控制子换流器低频侧零电压。在本文中，站 2 为 VF 站。VF 站工频侧仍然按照图 4 控制框图，控制图 2(a)中的各个工频子换流器电容电压到额定值。

以图 2(b)中的单个低频子换流器为例分析低频侧零电压控制策略，c 子换流器如图 5 所示。

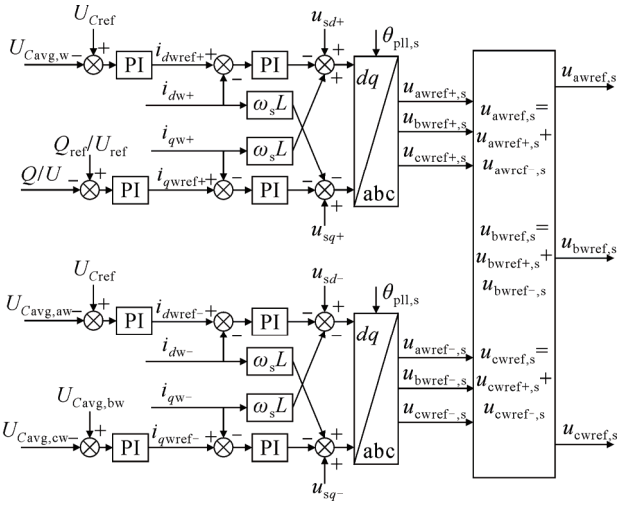


图 4　w 子换流器工频侧控制框图

Fig.4　Control diagram of w sub-converter at power frequency side

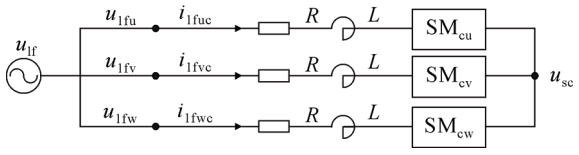


图 5　c 子换流器

Fig.5　c sub-converter

建立 c 子换流器的回路方程组

$$\begin{cases} u_{\mathrm{lfu}} = Ri_{\mathrm{lfuc}} + L\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{lfuc}}}{\mathrm{d}t} - u_{\mathrm{cu}} + u_{\mathrm{sc}} \\ u_{\mathrm{lfv}} = Ri_{\mathrm{lfvc}} + L\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{lfvc}}}{\mathrm{d}t} - u_{\mathrm{cv}} + u_{\mathrm{sc}} \\ u_{\mathrm{lfw}} = Ri_{\mathrm{lfwc}} + L\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{lfwc}}}{\mathrm{d}t} - u_{\mathrm{cw}} + u_{\mathrm{sc}} \end{cases} \tag{3}$$

式中：i_{lfuc}、i_{lfvc}、i_{lfwc}分别为 M3C 三相低频侧流入电流；u_{sc}为工频侧 c 点电压。由上述分析可得，只有低频电压电流作用时，工频侧 c 点电压 u_{sc}为共模电压，对低频侧控制并无影响。同样的分析也可适用于 a，b 两个低频子换流器。

为了控制图 5 中子换流器的低频侧零电压，通过低频侧外环电压幅值和参考值，生成电流内环指令，进而控制低频侧电压，VF 站低频侧为自产电压，低频侧电流正序 q 轴分量以及负序 dq 分量参考值都为零，具体控制如图 6 所示

$U_{\mathrm{ref,lf}}$和 U_{lf}分别为低频侧电网电压幅值的参考值和实际值；VF 站控制低频侧零电压时，$U_{\mathrm{ref,lf}}$=0；$i_{d\mathrm{cref+}}$、$i_{q\mathrm{cref+}}$、$i_{d\mathrm{cref-}}$、$i_{q\mathrm{cref-}}$分别为低频侧注入图 5 子换流器电流正序 d 轴、正序 q 轴、负序 d 轴及负序 q 轴分量参考值；i_{dc+}、i_{qc+}、i_{dc-}、i_{qc-}分别为低频侧注入图 5 子换流器电流的正序 d 轴、正序 q 轴、负序 d 轴及负序 q 轴分量实际值；$u_{\mathrm{lf}d+}$、$u_{\mathrm{lf}q+}$、$u_{\mathrm{lf}d-}$、$u_{\mathrm{lf}q-}$分别为低频侧电网电压正序 d 轴、正序 q 轴、负序 d 轴及负序 q 轴分量实际值；$\theta_{\mathrm{pll,lf}}$为 M3C 低频侧正序电压锁相环输出角度，VF 站为自产频率；ω_{lf}为低频系统角频率；$u_{\mathrm{curef+,lf}}$、$u_{\mathrm{cvref+,lf}}$、$u_{\mathrm{cwref+,lf}}$ 和 $u_{\mathrm{curef-,lf}}$、$u_{\mathrm{cvref-,lf}}$、$u_{\mathrm{cwref-,lf}}$以及 $u_{\mathrm{curef,lf}}$、$u_{\mathrm{cvref,lf}}$、$u_{\mathrm{cwref,lf}}$为图 5 子换流器低频侧正序控制器的调制波、负序控制器生成的调制波、以及最终整个低频侧控制器生成的总调制波；同理可以生成 M3C 另外两个 a 和 b 子换流器低频侧的总调制波 $u_{\mathrm{auref,lf}}$、$u_{\mathrm{avref,lf}}$、$u_{\mathrm{awref,lf}}$和 $u_{\mathrm{buref,lf}}$、$u_{\mathrm{bvref,lf}}$、$u_{\mathrm{bwref,lf}}$。

第 5 步，另一个站由 STATCOM 模式切换为 PQ 站模式后，VF 站建立低频电压并上升到额定值。

VF 站低频侧建立电压的控制策略如图 6 所示。PQ 站工频侧仍然按照图 4 控制框图，控制图 2(a)中的各个工频子换流器电容电压到额定值。在本文中，站 1 为 PQ 站。

由于 VF 站建立低频电压前，低频变压器 T12、低频变压器 T22、低频线路以及 PQ 站低频侧电压都为 0，VF 站建立低频电压期间会给低频变压器、

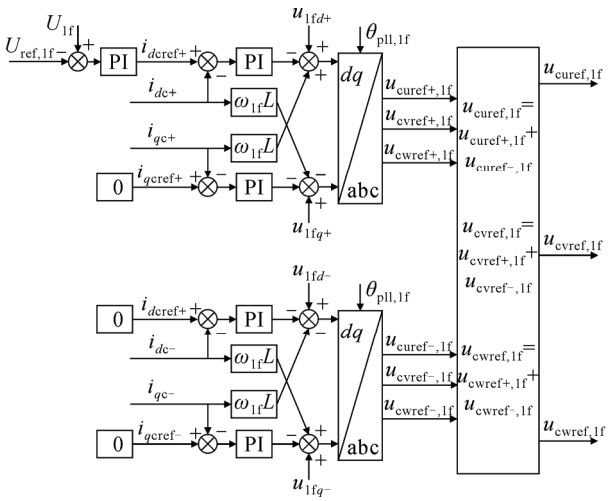


图 6 VF 站低频侧交流电压控制框图

Fig.6 AC voltage control diagram of VF station at low frequency side

低频线路以及 PQ 站充电，输电系统中会产生一定的涌流。该涌流可以分为两种，一种是对低频变压器和低频线路充电的涌流，另一种是对 PQ 站充电的涌流。

低频变压器励磁涌流是造成 LFTS 系统在启动过程中低频侧过电流冲击的主要原因。由变压器基本运行原理可知，变压器的磁通为

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \frac{1}{N_{\mathrm{p}}}\int u_{\mathrm{vlf}}(t)\mathrm{d}t = \frac{1}{N_{\mathrm{p}}}\int U_{\mathrm{vlf}}\sin\omega_{\mathrm{lf}}t\mathrm{d}t = \\ &\quad -\frac{U_{\mathrm{vlf}}}{\omega_{\mathrm{lf}}N_{\mathrm{p}}}\cos\omega_{\mathrm{lf}}t \end{aligned} \tag{4}$$

式中：ϕ为低频变压器的磁通；N_{p} 为低频变压器线圈匝数；u_{vlf}和 U_{vlf}分别为低频变压器阀侧电压瞬时值和幅值。由等式(4)可见，由于低频系统角频率 ω_{lf}相比于工频系统角频率 ω_{s}较低，因此在 LFTS 系统低频侧启动时，若直接控制低频系统电压从零阶跃到额定值，则将导致低频变压器磁通相较工频变压器的磁通发生更大的突变。尤其在变压器电压过零点时，磁通的突变将引起显著的过电流[20]。因此，考虑到 M3C 功率器件的有限耐受过电流能力，必须考虑 LFTS 启动过程中的涌流限制策略。

为了减小第 1 种涌流，VF 站建立低频交流电压期间，以较小的速率提升低频交流电压参考值 $U_{\mathrm{ref,lf}}$，可以是秒级或分钟级，具体根据变压器容量和线路参数确定时间，最终控制器将低频交流电压提升到额定值。

为了减小第 2 种涌流，需要在 VF 站建立低频

交流电压期间，PQ 站控制低频侧零功率，即低频侧零电流，满足柔性启动的另一个判据，线路三相电流始终保持零。通过 PQ 站低频侧功率外环实际值和参考值，生成内环电流指令，进而控制低频侧功率。根据式(3)和图 5，得到 PQ 站低频侧具体控制框图见图 7。

$P_{\mathrm{ref,lf}}$、P_{lf} 和 $Q_{\mathrm{ref,lf}}$、Q_{lf} 分别为图 5 子换流器与低频侧电网有功参考值、实际值和无功参考值、实际值，启动时参考值 $P_{\mathrm{ref,lf}}$=0、$Q_{\mathrm{ref,lf}}$=0。

VF 站建立低频电压期间，两个站需要各自叠加工、低频侧控制器生成的调制波，VF 站将图 4 和图 6 生成的调制波叠加，PQ 站将图 4 和图 7 生成的调制波叠加，最终生成的调制波如图 8 所示。

前 5 步中低频输电系统与两端的工频电网只有充电和 VF 站建立低频电压过程中的功率交换，功率交换值较小，可以忽略与外部接入的电网系统的要求和影响，只需要保证外部接入的电网系统的电压幅值和频率处于额定状态即可。除此之外，子模块电压稳定在额定值，符合文中图 4 的 w 子换流器工频侧控制框图的控制预期。

第 6 步，PQ 站输入指令升功率，启动结束。外部接入的电网系统用等效电源代替，保证了电网系统的电压幅值和频率处于额定状态，PQ 站按指令升功率时，以功率流向低频系统为正方向，稳定时站 2 工频电网输出有功功率到低频输电系统，站 1 工频电网从低频输电系统获取有功功率。

综合上述分析，LFTS 启动策略如附录 A 图 A1 所示。

2.2 停运策略

在停运时，为了实现零电压零电流状态下分线路开关 QF12 和 QF22，需要合理的泄放线路和变压器中的能量，不对低频输电系统产生冲击，本文提出一种无电压电流分开关的停运策略，实现 LFTS 柔性停运。柔性停运的判据为两点：一点是降低频电压到零期间，线路三相电流始终保持零。另一点是各个 M3C 换流站退出低频线路阶段，在零电压无电流条件下断开低频线路开关。

首先，在 PQ 站输入 0 功率指令，将有功无功功率降到 0，$P_{\mathrm{ref,lf}}$=0、$Q_{\mathrm{ref,lf}}$=0，具体控制策略如图 7 所示。外部接入的电网系统用等效电源代替，保证了电网系统的电压幅值和频率处于额定状态，PQ 站按指令降功率时，以功率流向低频系统为正方向，稳定时站 2 工频电网停止输出有功功率到低频输电

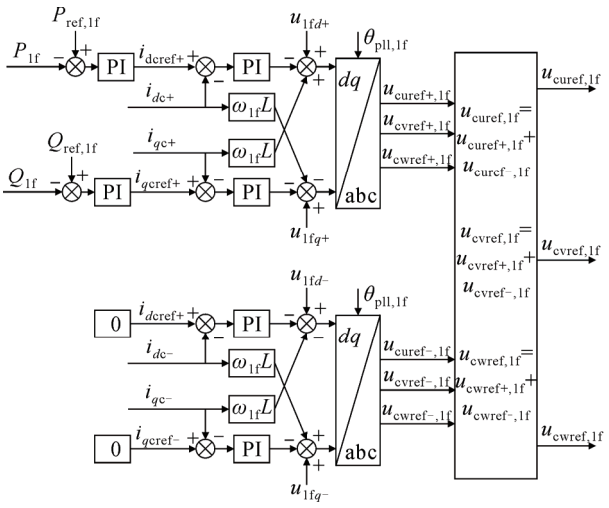


图 7 PQ 站低频侧功率控制框图

Fig.7 Power control diagram of PQ station at low frequency side

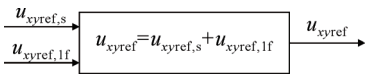


图 8 PQ 站和 VF 站调制波生成图

Fig.8 Modulated wave of PQ and VF station

系统，站 1 工频电网停止从低频输电系统获取有功功率。

第 2 步，在 VF 站输入零电压指令，$U_{\mathrm{ref,lf}}$=0，将低频电压降到零，最终使得低频变压器 T12、低频变压器 T22、开关 QF12 以及开关 QF22 对地电压都为零，具体控制策略如图 6 所示。

VF 站在降低频电压期间，与启动过程类似，降低低频交流电压参考值 $U_{\mathrm{ref,lf}}$ 到 0，通过 VF 站与工频交流电网回路，将低频变压器和低频线路中的能量泄放，PQ 站也不反向输送电能给 VF 站，不会对低频输电系统产生电压电流冲击，满足柔性停运的判据之一，线路三相电流始终保持零。

第 3 步，断开低频线路开关 QF12 和 QF22。低频线路开关 QF12 和 QF22 可以实现零压无流分闸，满足柔性停运的另一个判据，在零电压无电流条件下断开低频线路开关。

第 4 步，PQ 站闭锁，然后 VF 站闭锁，停运结束。后 3 步中低频输电系统与两端的工频电网只有在 VF 站降低频侧电压过程中的有功率交换，功率交换值较小，可以忽略与外部接入电网系统的要求和影响，只需要保证外部接入电网系统的电压幅值和频率处于额定状态即可。除此之外，子模块电压

稳定在额定值，符合文中图 4 w 子换流器工频侧控制框图的控制预期。

综合上述分析，LFTS 停运策略如附录 A 图 A2 所示。

3 实验验证

为了验证基于模块化多电平矩阵变换器的低频输电系统柔性启停策略的正确性，在实时数字仿真系统 RTDS 上进行相关启停实验，仿真系统的主要电气参数如附录 A 表 A1 所示。RTDS 仿真系统示意图如附录 A 图 A3 所示，控制后台截图如附录 A 图 A4 所示。

3.1 启动过程验证

启动过程第 2 步中，换流站在 STATCOM 模式下充电解锁波形如图 9 和图 10 所示。可以看出，在 M3C 由闭锁到解锁状态以及模块电容充电过程中，工频子换流器低频侧始终保持零电压，即 u_{lf}=0。那么低频变压器 T12 和 T22、开关 QF12 和 QF22 对地电压都为零。

解锁前为 M3C 为不控充电状态，工频换流变 T11 和 T21 阀侧相间电压，轮流给 M3C 换流器中的子模块充电，最终达到稳定时，单个桥臂子模块电压总和等于工频换流变 T11 和 T21 阀侧线电压幅值的一半，理论计算公式为：$0.5U_{\mathrm{v,line}}=NU_{\mathrm{Cavg}}$。本文 RTDS 仿真系统中，阀侧线电压幅值 $U_{\mathrm{v,line}}$=90.5 kV，桥臂子模块数 N=59 个，那么理论子模块电容电压平均值 U_{Cavg}=767 V。仿真波形中，模块电容被充电到 768 V 左右，与理论分析的充电电压一致，验证了 RTDS 仿真系统的真实性。

解锁后图 4 子换流器工频侧控制框图生效，参考值 U_{Cref} 以一定速率 ΔU=6.3 kV/s 递增，图 4 中的第 1 层控制器快速响应，注入工频正序电流来充电所有工频子换流器电容。各个桥臂电容在不控充电电压 767 V 基础上被充电到额定值 2150 V 且在运行过程中保持恒定，具体充电时间的理论计算公式为：(2150−767)/6.3=219.5 ms。仿真波形中，模块电容被充电到 2150 V 时，时间约为 220 ms，与理论分析的充电时间一致，验证了 RTDS 仿真系统的真实性以及控制的正确性。

启动过程第 3 步，如图 11 所示。由第二步可知低频侧处于零电压状态，所以无需检同期即可以合上低频线路开关 QF12 和 QF22，且对 LFTS 无电压电流冲击。验证了柔性启动的判据之一：各个 M3C 换流站接入到低频线路阶段，可以在零电压条件下合上低频线路开关。

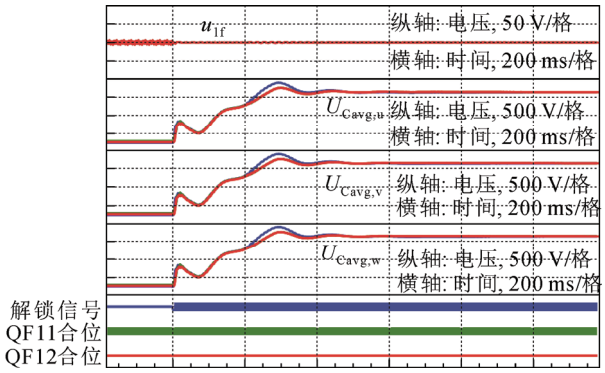


图 9 STATCOM 模式下换流站 1 的解锁波形

Fig.9 Deblocked wave of station 1 in STATCOM mode

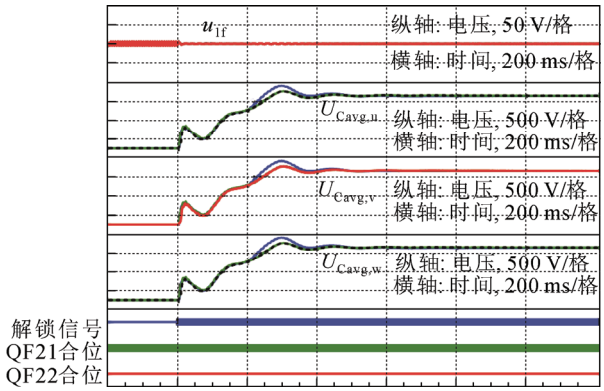


图 10 STATCOM 模式下换流站 2 的解锁波形

Fig.10 Deblocked wave of station 2 in STATCOM mode

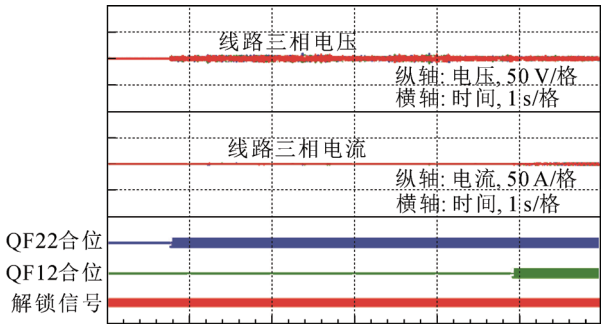


图 11 线路开关合闸时的电压电流波形

Fig.11 Voltage and current wave when line switches are closed

启动过程第 4 步和第 5 步，如图 12 所示。站 2 先切换为控制低频侧电压的 VF 站，且切换后继续控制低频侧零电压，图 6 VF 站低频侧交流电压控制框图生效。站 1 切换为控制低频侧功率的 PQ 站，且切换后继续控制低频侧零功率，图 7 PQ 站低频

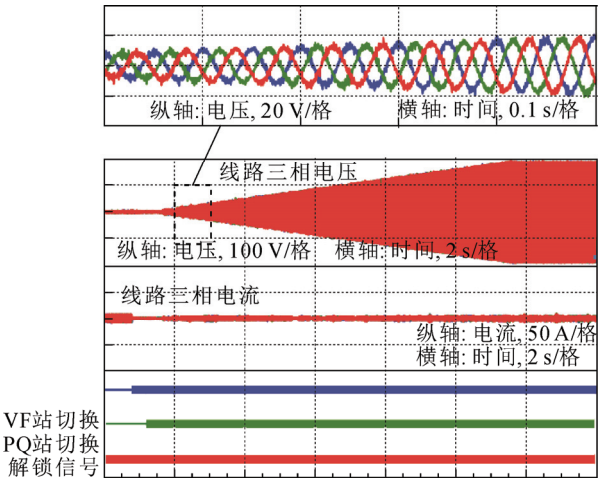


图 12　运行模式切换且建立低频线路电压过程波形

Fig.12　The process wave of switching operation mode and establishing the low-frequency line voltage

侧功率控制框图生效。站 1 切换为 PQ 站之后，VF 站开始建立低频电压，由零电压到额定线电压有效值 230 V 约 10 s，建立电压过程中，线路三相电流始终保持零，无电压电流冲击，切换瞬间的过程细节如附录 A 图 A7 所示。验证了柔性启动的另一个判据：建立低频电压期间，线路三相电流始终保持零。

启动过程第 6 步，如图 13 所示。PQ 站输入有功指令 300 MW，无功指令 0 MVA 升功率，整个启动过程结束。两端工频电网功率图如文中附录 A 图 A5(a)所示，稳定时站 2 工频电网输出 300 MW 有功功率到低频输电系统，站 1 工频电网从低频输电系统获取 300 MW 有功功率。如附录 A 图 A6(a)所示，升功率时，VF 站子模块电容电压短时跌落后恢复到额定值 2150 V，PQ 站子模块电容电压短时升高后恢复到额定值 2150 V，符合文中图 4 w 子换流器工频侧控制框图的控制预期。

从上述启动过程实验验证可得，本文提出的一种无同期启动策略切实可行，通过对换流器的灵活控制，使得启动过程中无电压电流冲击，满足柔性启动的判据，实现了换流站的柔性启动。

3.2　停运过程验证

停运过程第 1 步，如图 14 所示。PQ 站输入有功指令 0 MW，无功指令 0 MVA 降功率。两端工频电网功率图如文中附录 A 图 A5(b)所示，稳定时站 2 工频电网停止输出 300 MW 有功功率到低频输电系统，站 1 工频电网停止从低频输电系统获取 300 MW 有功功率。如附录 A 图 A6(b)所示，降功率时，VF 站子模块电容电压短时升高后恢复到额定值

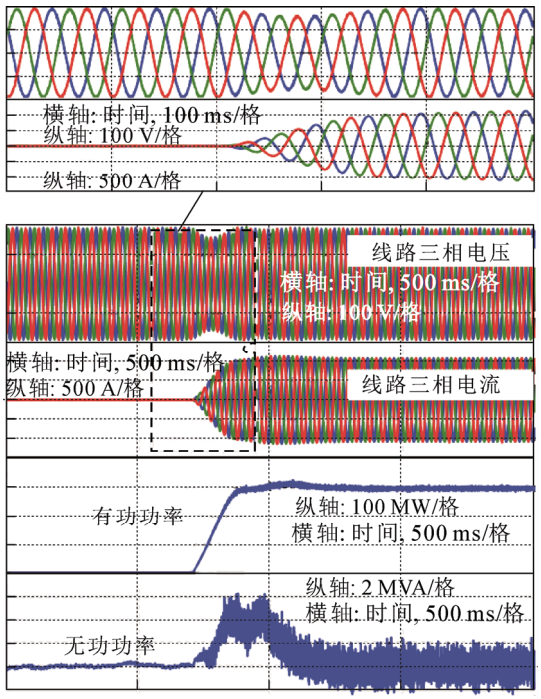


图 13　升功率的波形

Fig.13　The wave of power rise

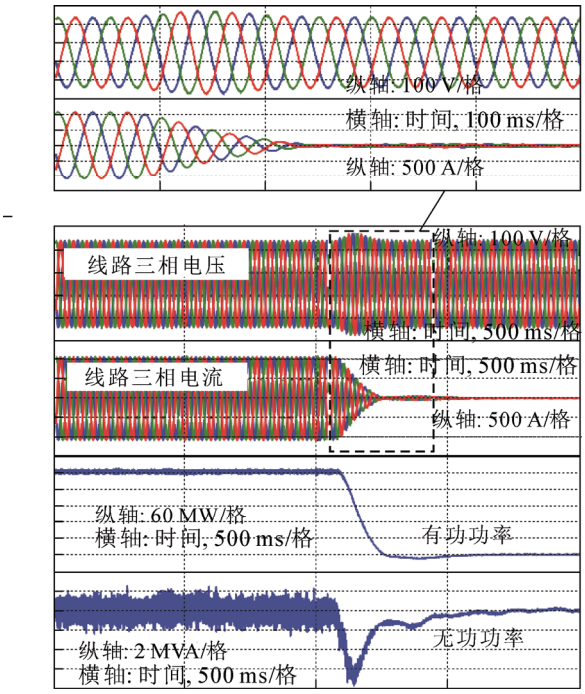


图 14　降功率的波形

Fig.14　The wave of power drop

2150 V，PQ 站子模块电容电压短时跌落后恢复到额定值 2150 V，符合文中图 4 w 子换流器工频侧控制框图的控制预期。

停运过程第 2 步，如图 15 所示。在 VF 站输入零电压指令，由额定线电压有效值 230 V 到零电压

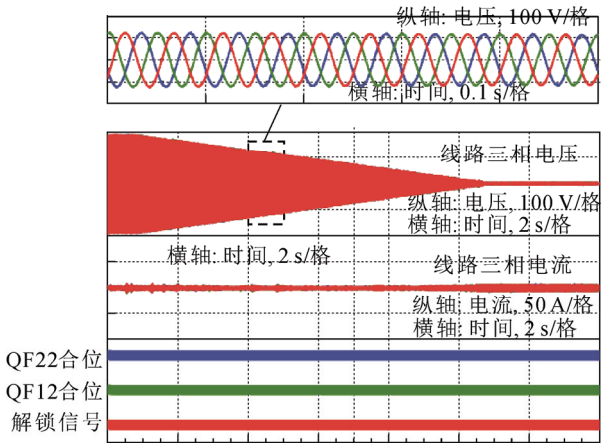


图 15 低频线路电压下降的过程波形

Fig.15 The process wave of reducing the low-frequency line voltage

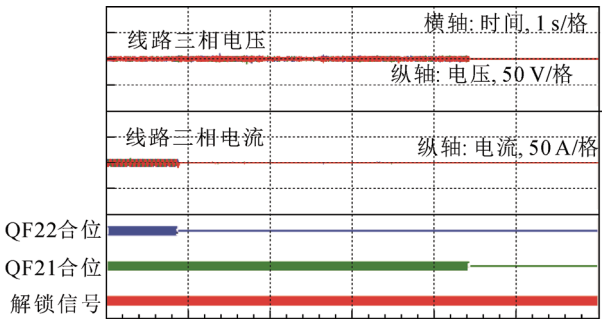


图 16 线路开关分闸时的电压电流波形

Fig.16 Voltage and current wave when line switches are opened

约 10 s，降电压过程中，线路三相电流始终保持零，无电压电流冲击。验证了柔性停运的判据之一：降低频电压到零期间，线路三相电流始终保持零。

停运过程第 3 步，如图 16 所示。由第 2 步可知低频侧处于零电压状态，低频线路开关 QF12 和 QF22 可以实现零压无流分闸。验证了柔性停运的另一个判据：各个 M3C 换流站退出低频线路阶段，可以在零电压无电流条件下断开低频线路开关。

从上述停运过程实验验证可得，本文提出的一种无电压电流分开关的停运策略切实可行，通过对换流器的灵活控制，使得停运过程中无电压电流冲击，满足柔性停运的判据，实现了换流站的柔性停运。

4 结论

本文提出了基于模块化多电平矩阵变换器的低频输电系统柔性启停策略，解决了启停时易出现的过压过流问题。通过对换流器的灵活控制，无需新增其他装置，方法简单有效，保障了设备的安全，所提策略具有良好的工程应用价值。主要结论如下：

1）提出了一种新颖的无同期启动策略，各 M3C 以 STATCOM 模式启动，实现低频线路开关在零电压电流情况下合闸。其中一站切换到低频侧主动定电压模式缓慢建立低频电压，其余站切换至功率控制模式按照指令升降功率，完成启动过程。

2）提出了一种无电压电流分开关的停运策略，将系统传输功率降到零后，控制低频侧交流电压到零，再分低频线路开关，防止线路和换流变放电过冲，最后各自换流站实现了无电压电流分开关的柔性停运过程。

3）在实时数字仿真系统 RTDS 上进行全面的启停及功率升降控制实验，验证了本文所提基于模块化多电平矩阵变换器的低频输电系统柔性启停策略的正确性。所提策略具有良好的工程应用前景和价值。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 黄明煌，王秀丽，刘沈全，等. 分频输电应用于深远海风电并网的技术经济性分析[J]. 电力系统自动化，2019，43(5)：167-174.
HUANG Minghuang, WANG Xiuli, LIU Shenquan, et al. Technical and economic analysis on fractional frequency transmission system for integration of long-distance offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 167-174.

[2] 王秀丽，张小亮，宁联辉，等. 分频输电在海上风电并网应用中的前景和挑战[J]. 电力工程技术，2017，36(1)：15-19.
WANG Xiuli, ZHANG Xiaoliang, NING Lianhui, et al. Application prospects and challenges of fractional frequency transmission system in offshore wind power integration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 15-19.

[3] CHEN H, JOHNSON M H, ALIPRANTIS D C. Low-frequency AC transmission for offshore wind power[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2236-2244.

[4] 马信乔，程启明，江 畅，等. 基于双载波调制策略的模块化多电平矩阵变换器的优化电平方法[J]. 高电压技术，2021，47(3)：963-971.
MA Xinqiao, CHENG Qiming, JIANG Chang, et al. Optimized level method for modular multilevel matrix converter based on dual-carrier modulation strategy[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 963-971.

[5] 李姝玉，于弘洋，葛 菁，等. 双端口矩阵变换器在工/低频电网互联下的电容及电压波动特性分析[J]. 电网技术，2020，44(4)：1437-1444.
LI Shuyu, YU Hongyang, GE Jing, et al. Analysis of capacitance and voltage fluctuation characteristics of two-port matrix converter under power/low frequency interconnection[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1437-1444.

[6] YAO W X, LIU J, LU Z Y. Distributed control for the modular multi-level matrix converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,

2019, 34(4): 3775-3788.

[7] 王文杰，杨益平，杭丽君，等. 应用于交-交变换的 M3C 矩阵变换器系统控制策略[J]. 电力系统自动化，2020，44(12)：186-192.
WANG Wenjie, YANG Yiping, HANG Lijun, et al. Control strategy of M3C matrix converter system applied to AC-AC transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 186-192.

[8] 李　峰，王广柱，刘汝峰. 模块化多电平矩阵变换器低频控制方法[J]. 电力系统自动化，2016，40(2)：127-133.
LI Feng, WANG Guangzhu, LIU Rufeng. A low-frequency control scheme for modular multilevel matrix converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 127-133.

[9] OU Z J, WANG G Z, ZHANG L H. Modular multilevel converter control strategy based on arm current control under unbalanced grid condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 3826-3836.

[10] 滕予非，宁联辉，王锡凡. 分频输电系统交交变频器桥臂短路故障研究[J]. 西安交通大学学报，2014，48(2)：56-61.
TENG Yufei, NING Lianhui, WANG Xifan. Short fault of bridge arm in cycloconverter for fractional frequency transmission system[J]. Journal of Xi’an Jiaotong University, 2014, 48(2): 56-61.

[11] 吴小丹，王鹏飞，朱信舜，等. 星型链式 STATCOM 闭环负序注入法控制策略[J]. 电力电子技术，2020，54(4)：40-44.
WU Xiaodan, WANG Pengfei, ZHU Xinshun, et al. Research on negative sequence closed-loop current injection control strategy of star cascaded STATCOM[J]. Power Electronics, 2020, 54(4): 40-44.

[12] 王锡凡，王秀丽，滕予非. 分频输电系统及其应用[J]. 中国电机工程学报，2012，32(13)：1-6.
WANG Xifan, WANG Xiuli, TENG Yufei. Fractional frequency transmission system and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 1-6.

[13] 吴小丹，王鹏飞，曹冬明. 星形链式 STATCOM 直流侧输入阻抗及交直流功率耦合关系分析[J]. 电力自动化设备，2021，41(4)：70-76.
WU Xiaodan, WANG Pengfei, CAO Dongming. Analysis on DC-side input impedance and AC/DC power coupling relationships of star cascaded STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 70-76.

[14] 张　扬，万安平，杨小品. 基于平均模型的高压链式 STATCOM 功率模块直流电压失控机理[J]. 高电压技术，2019，45(7)：2134-2140.
ZHANG Yang, WAN Anping, YANG Xiaopin, et al. Mechanism of incontrollable DC voltage of sub modules for cascaded STATCOM under higher voltage based on average modeling[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2134-2140.

[15] 张　扬，林卫星，邓才波，等. 星形链式 STATCOM 的冗余容错控制算法[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3398-3406.
ZHANG Yang, LIN Weixing, DENG Caibo, et al. Redundant fault-tolerant control algorithm of star-connected cascaded STATCOM[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3398-3406.

[16] 吴小丹，朱海勇，董云龙，等. 面向柔性低频输电的模块化多电平矩阵变换器分频分层控制[J]. 电力系统自动化，2021，45(18)：131-140.
WU Xiaodan, ZHU Haiyong, DONG Yunlong, et al. Frequency-division and hierarchical control of modular multilevel matrix converter for flexible low-frequency transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 131-140.

[17] 沙广林，刘　斌，邬玮晗，等. 多端柔性互联的交直流配电系统分层控制策略[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3509-3520.
SHA Guanglin, LIU Bin, WU Weihan, et al. Hierarchical control strategy for multi-terminal flexible interconnected AC/DC power distribution systems[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3509-3520.

[18] 李兴源，曾　琦，王渝红，等. 柔性直流输电系统控制研究综述[J]. 高电压技术，2016，42(10)：3025-3037.
LI Xingyuan, ZENG Qi, WANG Yuhong, et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3025-3037.

[19] 叶志军，苟炬龙，曾文辉，等. 非同期合闸引起的变压器铁心饱和[J]. 电机与控制学报，2019，23(1)：89-98.
YE Zhijun, GOU Julong, ZENG Wenhui, et al. Transformer core saturation caused by non-synchronization switching[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(1): 89-98.

[20] 叶志军，于　旺，郑荣显，等. 变压器空充下的励磁涌流二次谐波特性分析[J]. 电力系统自动化，2020，44(24)：145-150.
YE Zhijun, YU Wang, ZHENG Rongxian, et al. Characteristic analysis of second harmonic of magnetizing inrush current with no-load transformer energization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 145-150.



陆立文(通信作者)
1990—，男，硕士，工程师
主要从事柔性直流输电系统及其应用、柔性低频输电系统等方面的研究工作
E-mail: lulw@nrec.com

LU Liwen
Corresponding author

收稿日期　2021-09-28　在线出版日期　2021-11-20　　编辑　陈　蔓

附录 A

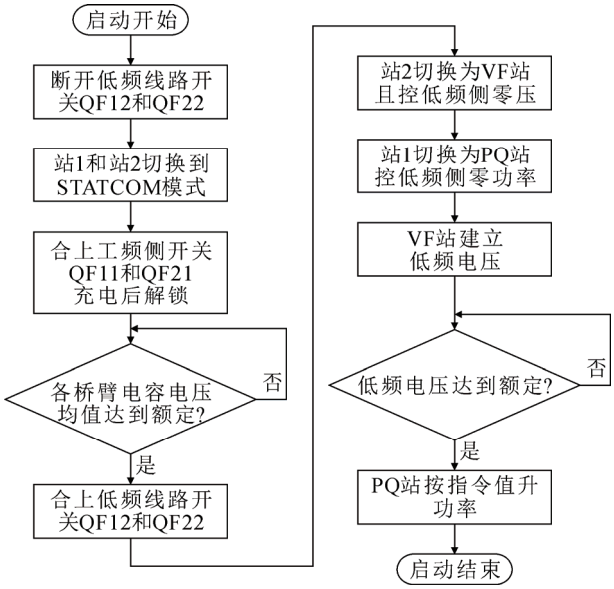


图 A1　低频输电系统启动流程图

Fig.A1　Startup flowchart of low frequency transmission system

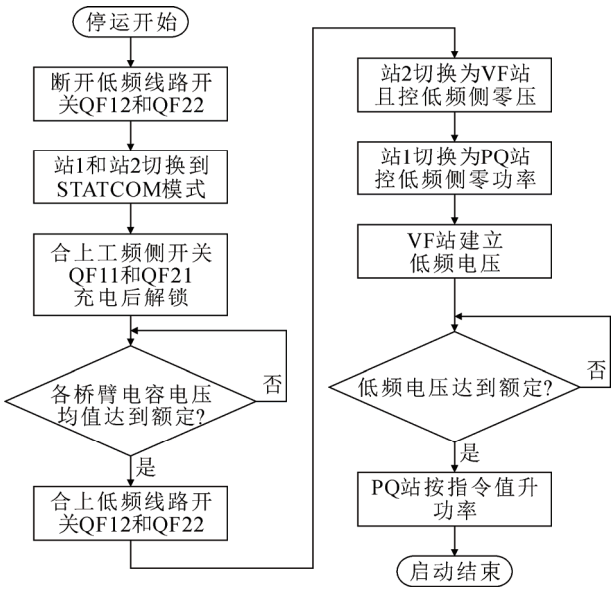


图 A2　低频输电系统停运流程图

Fig.A2　Shutdown flowchart of low frequency transmission system

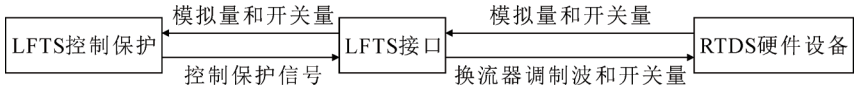


图 A3　RTDS 仿真系统示意图

Fig.A3　RTDS simulation system

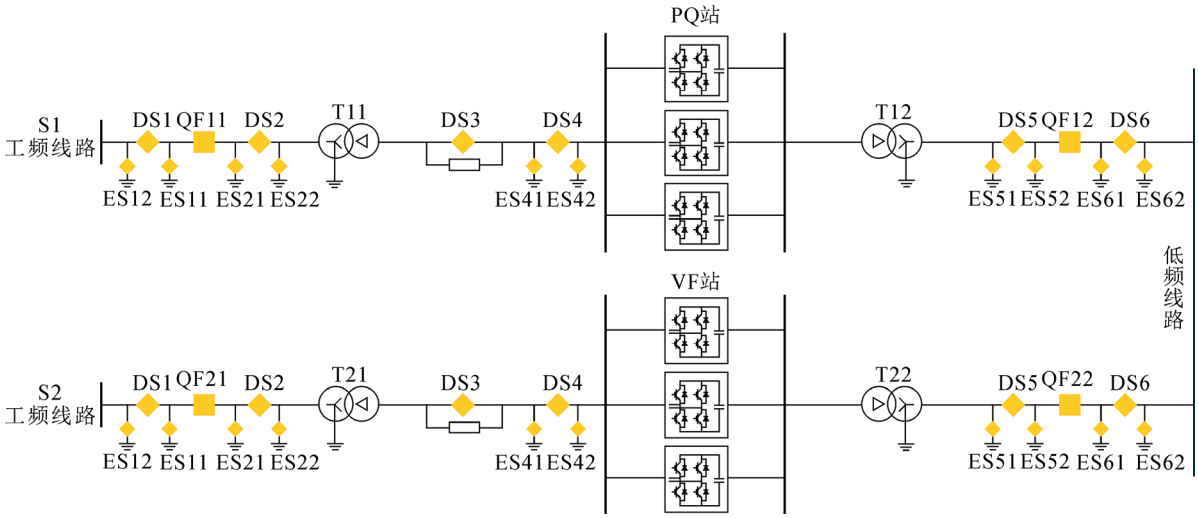
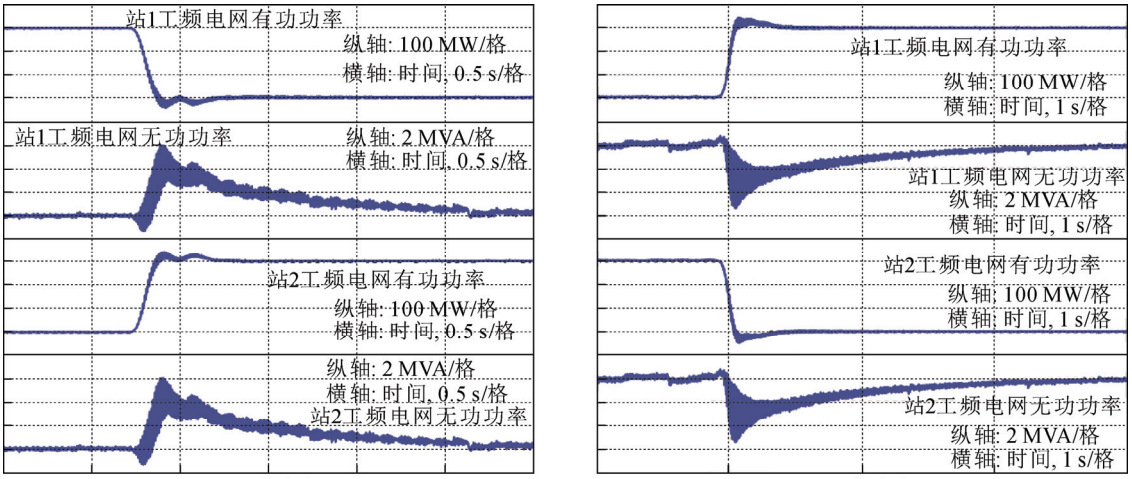


图 A4　控制后台截图

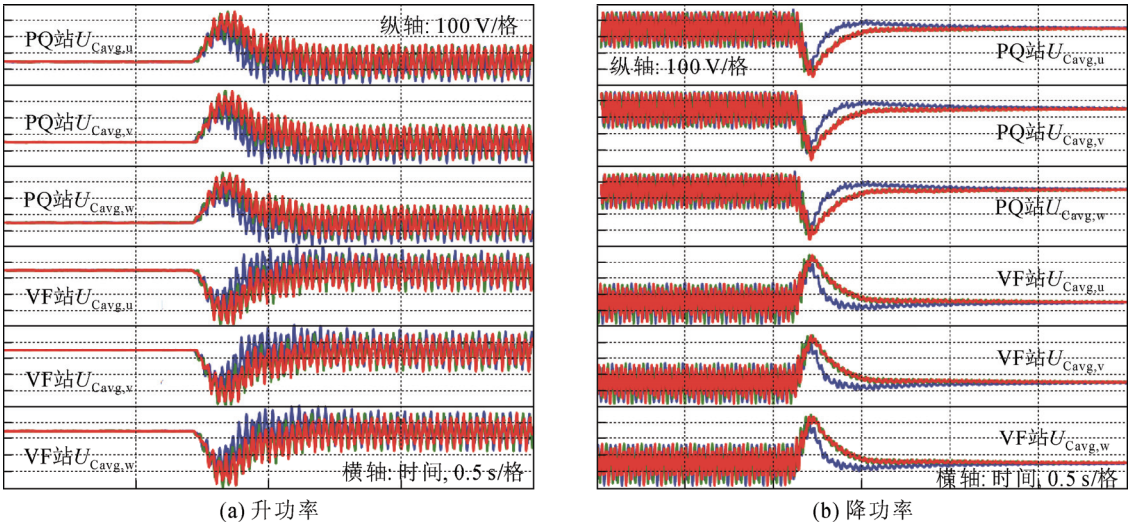
Fig.A4　The screenshot of control board



(a) 升功率　　(b) 降功率

图 A5　升降功率的工频网侧波形

Fig.A5　The wave of power rise and drop on the grid side



(a) 升功率　　(b) 降功率

图 A6　升降功率阶段各子模块电容电压波形

Fig.A6　The voltage wave of sub module capacitance in the power rise and drop

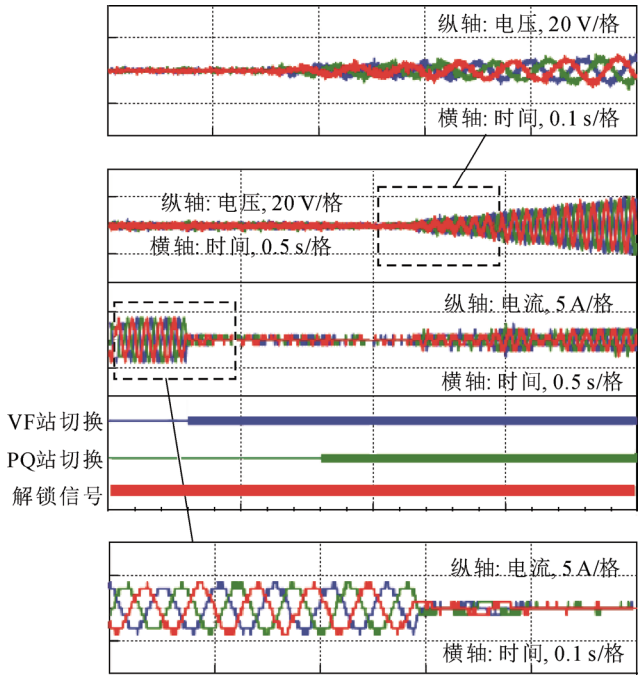


图 A7　运行模式切换瞬间的过程细节波形

Fig.A7　The detailed wave at the moment of operation mode switching

表 A1　RTDS 仿真系统的主要电气参数

Table A1　Main electric parameters of RTDS simulation system

主设备	电气参数	额定值
工频变压器 T11/T21	容量	330 MVA
	变比	230 kV/64 kV
低频变压器 T12/T22	容量	330 MVA
	变比	230 kV/64 kV
M3C 换流器	容量	300 MVA
	模块电容电压	2150 V
	模块电容值	15 mF
	桥臂电抗器值	15 mH
	桥臂子模块数	59 个
	低频侧额定频率	20 Hz
	低频侧频率变化范围	15 Hz~50 Hz
低频侧线路	线路参数	长度：20 km； 正序电阻：0.79E-4 欧姆/米； 正序电抗：1.637E-4 欧姆/米； 正序容抗：0.834E3 兆欧姆/米；