

DOI: 10.7667/PSPC151131

模块化多电平换流器启停控制策略

杨晓楠¹, 陈红坤¹, 石晶¹, 胡文燕¹, 王志成¹, 刘佳¹, 罗辉²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 国网湖北省电力公司技术培训中心, 湖北 武汉 430011)

摘要: 为了平稳快速地启停模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter MMC), 提出了可应用于有源或无源网络的 MMC 启停控制策略。启动控制策略和停机控制策略均可分为不可控和可控两个阶段, 其中可控阶段可进一步分为直流电压可控和功率可控阶段。在不可控阶段, 修正了启动过程的限流电阻参数, 提出了停机过程的放电电阻选取原则。在直流电压可控阶段, 采用子模块电容电压、投切数与直流电压协调控制方法, 计算出启动时的直流电压跌落值和停机时的能量反馈比。在功率可控阶段, 根据 MMC 应用于有源和无源网络控制策略的不同, 提出了相应的策略。最后基于 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型, 验证了所提启停控制策略的有效性和正确性。

关键词: 模块化多电平换流器; 启动控制; 停机控制; 不可控阶段; 可控阶段

Start/shutdown control strategy of modular multilevel converter

YANG Xiaonan¹, CHEN Hongkun¹, SHI Jing¹, HU Wenyan¹, WANG Zhicheng¹, LIU Jia¹, LUO Hui²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Wuhan Electric Power Technical College, Wuhan 430011, China)

Abstract: To start/shutdown modular multilevel converter smoothly and quickly, the start/shutdown control strategies applied to MMC connecting active or passive network are proposed. Every strategy can be divided into two stages: uncontrollable and controllable stage. And the controllable stage can be further divided into DC voltage and power control stage. In the uncontrollable stage, the limiting resistance is modified, and the selection principle of the discharge resistance is presented. In the DC voltage control stage, the coordination control between the sub-module capacitor voltage, switching number and DC voltage are adopted. And DC voltage drop value of start strategy and energy feedback ratio of shutdown strategy are calculated. In the power control stage, the corresponding strategy is proposed aiming at MMC connecting active and passive network. Finally, the effectiveness and correctness of the proposed start/shutdown control strategy are verified based on PSCAD/EMTDC simulation model.

Key words: modular multilevel converter; start control; shutdown control; uncontrollable stage; controllable stage

0 引言

模块化多电平换流器相比传统的两电平和三电平电压源换流器拓扑结构具有很多的优势, 其采用子模块级联的方式, 有利于电压等级的提高和输送功率的提升, 使得电压源换流器扩展性好, 工程周期短, 输出电压波形质量高, 运行损耗低, 应用范围广, 具有广阔的发展前景^[1-2]。

启动控制是 MMC 正常工作运行的前提和基础, 也是近来的一个研究热点。根据 MMC 子模块电容由近端还是远端交流系统启动, 现有的启动控制可以分为近端启动和远端启动两种。文献[3-4]采用了近端启动控制方式, 文献[3]控制子模块电容电

压逐个充电到额定值, 该方法控制复杂, 充电时间较长, 且子模块电容电压为 0 时, IGBT 驱动电路无法正常工作。文献[4]采用了两阶段近端启动控制方法, 只适合于两端有源的场合, 不能应用于无源和黑启动场合。文献[5-7]均给出了可以应用于无源或者黑启动场合的远端启动控制方式。其中, 文献[5]选择直流电压建立初期解锁无源换流站, 以减小解锁瞬间的电压跌落和电流冲击, 但解锁时刻的固定限制了其应用范围。文献[6]采用有序解锁方式的方式, 但是其控制效果受步长的影响较大。文献[7]提出的多端 MMC 启动控制有一定借鉴作用, 但没有详细讨论子模块电容充电的动态过程。文献[8-10]分别提出了 LCC-MMC 启动控制、基于箝位

双子模块 MMC 启动控制策略以及一种改进子模块拓扑结构的启动控制, 但均不适用于基于半桥型子模块的 MMC 场合。

同时, 由于器件使用寿命有限, 为最大长度延长换流站的使用寿命需要定期对其进行维护和检修, 因此停机策略也是系统工作所必需的。关于 MMC-HVDC 停机控制的研究比较少, 文献[3]提出了一种停机策略, 分为能馈和能耗两个阶段, 其中能馈阶段还有进一步向交流系统馈能的潜力。文献[11]只是提出了向无源网络供电的停机策略, 没有提及应用于有源网络的停机策略。

本文根据 MMC 启动和停机一定程度上的可逆性, 将二者均分为不可控阶段, 直流电压可控阶段, 功率可控阶段。在不可控阶段修正了启动过程的限流电阻参数, 提出了停机过程的放电电阻选取原则。在直流电压可控阶段, 提出了子模块电容电压、投切数与直流电压协调控制方法, 计算出启动时的直流电压跌落值和停机时的能量反馈比。在功率可控阶段, 根据 MMC 应用于有源网络和无源网络控制策略的不同, 提出了相应的策略。最后基于 PSCAD/EMTDC 验证了所提出启停控制策略的正确性和有效性。

1 MMC 基本原理

MMC 的主电路拓扑结构如图 1 所示。柔性直流输电系统中 MMC 按照控制方式的不同可以分为两类, 直流电压控制 MMC(DCMMC)和非直流电压控制(交流电压控制、有功功率控制等)MMC(NTMMC)。MMC 均由三相六桥臂构成, 每个桥臂包含级联的半桥子模块、桥臂电抗器和电阻。每个半桥子模块具有三种工作状态: 投入、切除与闭锁, 如表 1 所示。

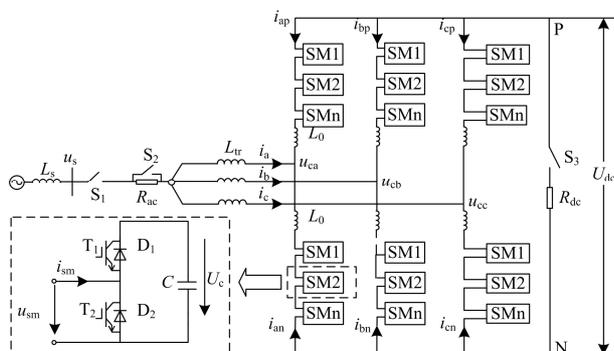


图 1 MMC 拓扑结构和子模块单元

Fig. 1 MMC topological structure and module unit

表 1 MMC 子模块的工作状态

Table 1 Working state of MMC sub module

模式	T1	T2	i_{sm}	u_{sm}
投入	导通	关断	>0	U_c
			<0	U_c
切除	关断	导通	>0	0
			<0	0
闭锁	关断	关断	>0	U_c
			<0	0

网侧三相交流电压为 u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} , 三相交流电流为 i_a 、 i_b 、 i_c , MMC 阀侧三相交流电压为 u_{ca} 、 u_{cb} 、 u_{cc} , 直流电压值为 U_{dc} , 每相上、下桥臂电流分别为 i_{xp} 、 $i_{xn}(x=a, b, c)$, 交流系统等效电感为 L_s , L 为桥臂电感, C 为子模块电容值, L_{tr} 为换流变压器漏感, R_{ac} 、 R_{dc} 分别为交流限流电阻和直流放电电阻, 而 S_1 为交流并网开关, S_2 和 S_3 分别 R_{ac} 和 R_{dc} 的投入开关。 N 为每个桥臂包含的子模块数, n 为每相子模块的额定投入数目。

2 启停控制策略设计

MMC 的停机控制分为正常停机和紧急停机。正常停机是指因换流站计划内检修、系统运行方式改变等必须停运该回直流线路, 需保证换流站基本不带电; 紧急停机则是指系统发生严重故障时将 MMC 快速退出运行, 直接将换流站闭锁, 断开交流侧断路器即可, 本文中的停机控制均指正常停机。启动和停机过程二者的思路分别如下:

(1) 启动控制: 闭合 DCMMC 侧交流侧断路器, 接入限流电阻, 直流电压上升为交流侧线电压的幅值; 解锁 DCMMC, 控制系统直流电压上升为额定值; 解锁 NTMMC, 闭合 NTMMC 侧交流侧断路器, 控制系统传输的有功功率和无功功率至额定值。

(2) 停机控制: 降低系统传输的有功功率和无功功率为零, 闭锁 NTMMC, 断开 NTMMC 侧交流侧断路器; 控制系统直流电压降低为交流侧线电压的幅值, 闭锁 DCMMC; 断开 DCMMC 侧交流侧断路器, 接入直流侧放电电阻, 释放子模块电容剩余能量。

通过以上对比发现, 启动过程和停机过程基本是相反的两个过程, 均可分为三个阶段, 不可控阶段, 直流电压可控阶段, 功率可控阶段, 每个阶段二者也是相反的过程。下面分别对两类换流站启动和停机的三个阶段进行介绍, 其中下标“1”和“2”分别代表 DCMMC 侧和 NTMMC 侧的量。

2.1 启动控制

2.1.1 不可控阶段

不可控阶段中所有子模块均为闭锁状态, 闭合

DCMMC 交流侧断路器 S_{11} ，断开 NTMMC 侧交流断路器 S_{12} ，断开 S_2 投入交流侧限流电阻 R_{ac} ，将直流电压从零提升至交流线电压的幅值。不可控充电完成后，直流电压达到交流线电压的幅值 U_{11} ，其中，DCMMC 子模块电容电压为 U_{11}/n_1 ，NTMMC 子模块电容电压为 $U_{11}/2n_2$ 。

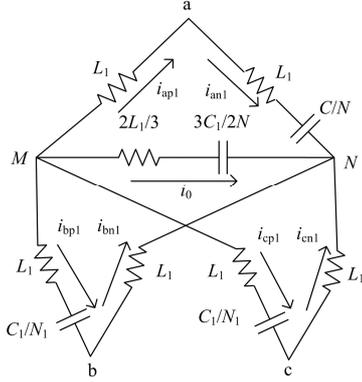


图 2 交流不可控充电等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of AC uncontrollable charge

图 2 所示为 DCMMC 交流不可控充电等效电路，上桥臂参考方向为从 M 到 a 、 b 、 c ，下桥臂参考方向为从 a 、 b 、 c 到 N 。交流不可控预充电以桥臂为单位，当一个桥臂子模块全部切除时，桥臂等效为桥臂电感 L_1 ；当一个桥臂子模块全部处于充电状态时，桥臂等效为电感 L_1 和电容串联 C_1/N_1 。由于 DCMMC 不可控阶段为 NTMMC 充电， M 、 N 点之间并入 NTMMC 等效支路，流过电流为 i_0 ，参考方向为从 M 到 N 。以 $u_{sa} > u_{sb} > u_{sc}$ 为例，根据 KVL 定律对图 5 电路列写方程可得：

$$\begin{cases} u_{ca1} = -j\omega L_1 i_{ap1} + j\omega L_1 i_{bp1} - j\frac{N_1}{\omega C_1} i_{bp1} + u_{cb1} \\ u_{ca1} = j\omega L_1 i_{an1} - j\frac{N_1}{\omega C_1} i_{an1} - j\omega L_1 i_{bn1} + u_{cb1} \\ u_{ca1} = -j\omega L_1 i_{ap1} + j\omega L_1 i_{cp1} - j\frac{N_1}{\omega C_1} i_{cp1} + u_{cc1} \\ u_{ca1} = j\omega L_1 i_{an1} - j\frac{N_1}{\omega C_1} i_{an1} - j\omega L_1 i_{cn1} + u_{cc1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X i_0 = j\omega L_1 i_{ap1} + i_{an1} (-j\frac{N_1}{\omega C_1} + j\omega L_1) \\ X i_0 = (-j\frac{N_1}{\omega C_1} + j\omega L_1) i_{bp1} + j\omega L_1 i_{bn1} \\ X i_0 = (-j\frac{N_1}{\omega C_1} + j\omega L_1) i_{cp1} + j\omega L_1 i_{cn1} \end{cases} \quad (2)$$

其中， $X = j(2\omega L_2 / 3 - 2N_2 / 3\omega C_2)$ 。

根据 KCL 定律可得桥臂电流之间的关系：

$$i_{ap1} + i_{bp1} + i_{cp1} + i_0 = 0, \quad i_{an1} + i_{bn1} + i_{cn1} + i_0 = 0 \quad (3)$$

结合式(1)~式(3)可以得

$$u_{ca1} \approx \left[\frac{j\omega L_1}{2} + \frac{j(p-1)N_1}{6\omega C_1} \right] i_{a1} \quad (4)$$

$$p = N_1 / (N_1 + 3j\omega C_1 X - 2\omega^2 L_1 C_1) \quad (5)$$

p 为电流 i_0 和 i_{1a} 的比值。限流电阻 R_{ac} 的选取原则之一是充电电流最大值不能超过系统允许的最大值 I_{max} ，即

$$\frac{\sqrt{2}U_{s1}}{\sqrt{R_{ac}^2 + \omega^2(L_{s1} + L_{tr1} + \frac{L_1}{2} + \frac{p-1}{6\omega^2 C_1} N_1)^2}} \leq I_{max} \quad (6)$$

令 $X_e = \omega(L_{tr1} + L_{s1} + L_1 / 2 + (p-1)N_1 / 6\omega^2 C_1)$ ，则限流电阻 R_{ac} 应该满足

$$\sqrt{\frac{2U_{s1}^2}{I_{max}^2} - X_e^2} \leq R_{ac} \quad (7)$$

2.1.2 直流电压控制阶段

直流电压控制阶段，DCMMC 解锁，控制直流电压按斜率 $K=k_1$ 线性增加，与此同时，NTMMC 每相闭锁的子模块数 $N(t)$ 按斜率 $Y=y_1$ 减少，则

$$U_{dc1}(t) = U_{11} + Kt \quad (8)$$

$$Y = y_1 = (U_{dcN} - U_{11}) / (n_2 - 2N_2) \quad (9)$$

式中： $U_{dc1}(t)$ 为 t 时刻系统直流电压； U_{dcN} 为额定直流电压。

当直流电压为额定值时闭锁 n_2 个子模块，其余子模块处于切除状态，稳定后子模块电容电压为 U_{dcN}/n_2 。则 $N(t)$ 为

$$N(t) = \text{round}\left(2N_2 - \frac{U_{dc2}(t) - U_{11}}{y_1}\right) \quad (10)$$

其中 $U_{dc2}(t)$ 为任意 t 时刻 MMC 侧直流电压值。如图 3 所示为 MMC 每相投入的子模块数 $N(t)$ 与直流电压 $U_{dc2}(t)$ 之间的关系。

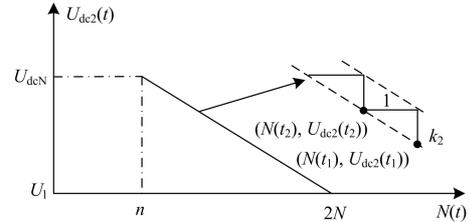


图 3 MMC 闭锁子模块数与直流电压关系

Fig. 3 Relationship between number of blocking sub-modules and DC voltage for MMC

定义直流电压每次的跌落值百分数 $\Delta U\%$ 为

$$\Delta U\% = \frac{U_{dc2}(t_2)}{N(t_2)}(N(t_1) - N(t_2)) \frac{1}{U_{dc2}(t_2)} = \frac{1}{N(t_2)}(N(t_1) - N(t_2)) = \frac{1}{N(t_2)} \quad (11)$$

$U_{dc2}(t_1)$ 、 $N(t_1)$ 分别为上一次直流电压跌落 t_1 时刻直流电压值和每相投入的子模块数。 $U_{dc2}(t_2)$ 、 $N(t_2)$ 时刻为下一次直流电压跌落 t_2 时刻的直流电压值和每相投入的子模块数。由式子(11)可知, 直流电压跌落百分数只与跌落时刻的每相投入的子模块数有关, 其最大值为 $1/(n_2+1)$ 。

DCMMC 在直流电压控制阶段从交流侧吸收的有功功率为

$$P(t) \approx \sum_{i=1}^2 \frac{12N_i C_i u_{dc}(t) du_{dc}(t)}{n_i^2} \leq 12k_1 U_{dcN} \left(\frac{N_1 C_1}{n_1^2} + \frac{N_2 C_2}{n_2^2} \right) \quad (12)$$

DCMMC 运行在单位功率因素时,

$$P = \frac{3}{2} U_{m1} i_{sd}$$

i_{sd} 为三相电流在同步旋转坐标系中的 d 轴分量, 相电压幅值 $U_{m1} = \sqrt{2}U_{s1}$, 所以

$$k_1 \leq \frac{U_{m1} n_1^2 n_2^2 I_{lim}}{8U_{dcN} (N_1 C_1 n_2^2 + N_2 C_2 n_1^2)} \quad (13)$$

2.1.3 功率控制阶段

当直流电压上升为额定值时, 解锁 NTMMC, 闭合交流断路器 S_{12} 。若 NTMMC 连接无源系统, 则采用定交流电压控制器, 直接合闸交流断路器 S_{12} , 逐步增加负荷至额定值。若为有源系统, 则采用定有功功率和定无功功率控制方式, 以检同期方式闭合 S_{12} , 逐步增加系统传输的有功功率和无功功率至额定值。

2.2 停机控制

2.2.1 功率控制阶段

功率控制阶段中, 若 NTMMC 连接无源系统, 逐步减少负荷至零, 闭锁 NTMMC, 断开交流断路器 S_{12} 。若 NTMMC 连接有源系统, 首先逐步降低传输的有功功率和无功功率为零, 再闭锁 NTMMC, 断开交流断路器 S_{12} 。

2.2.2 直流电压控制阶段

直流电压控制阶段中, DCMMC 控制系统直流电压按斜率 $K=k_2=-k_1$ 从额定值降低为交流线电压幅值, 与此同时, NTMMC 每相投入的子模块数按斜率 $Y=\gamma_2=-\gamma_1$ 线性增多, 直至每相所有子模块全部

投入, 然后闭锁 DCMMC。

根据文献[4]定义反馈至电网的能量和反馈前能量的比值为能量反馈比 δ , 可以计算得到 DCMMC 和 NTMMC 的 δ_1 和 δ_2 分别为

$$\delta_1 = 1 - 3m^2(1 - \gamma_1^2)/4 \quad (14)$$

$$\delta_2 = 1 - 3m^2(1 - \gamma_2^2)/16 \quad (15)$$

式中: m 为电压调制度; γ_1 和 γ_2 分别为 DCMMC 和 NTMMC 的子模块冗余率。

2.2.3 不可控阶段

不可控阶段, 断开交流断路器 S_{11} , 闭合 S_{31} 投入直流侧放电电阻 R_{dc1} , 闭合 S_{32} 投入直流侧放电电阻 R_{dc2} , 将直流电压从交流线电压的幅值 U_{11} 降低至 $U_{min}=75V^{[4]}$ 。为了加快子模块电容放电过程, 停机过程可以分为两步, 第一步三相依次投入一个子模块, 其余子模块处于切除状态, 直至子模块电容电压放电至满足要求, 见式子(16)(17)。第二步三相子模块以桥臂为单位依次投入, 其余子模块全部处于切除状态, 直至子模块电容电压达到安全阈值 U_{min} 。其中

$$U_{st1} = U_{11} / N_1^2 \quad (16)$$

$$U_{st2} = U_{11} / 2N_2^2 \quad (17)$$

U_{st1} 、 U_{st2} 分别表示 DCMMC 和 NTMMC 进入耗能第二阶段的电容电压值, 保证第二步起始时刻每个桥臂电容电压之和等于第一步起始时刻每个子模块电容电压值, 以方便分析和计算。

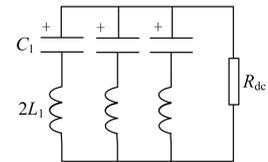


图 4 等效放电电路

Fig. 4 Equivalent discharging circuit

放电电阻的选择需要综合考虑放电时间及 IGBT 的最大电流量要求。以 DCMMC 不可控停机阶段为例, 近似忽略 L_1 影响^[11], 其不可控阶段的等效放电电路可化为一阶 RC 电路, 如图 4 所示。则

$$u_c(t) = (U_{11}/N_1) e^{-t/\tau} \quad (18)$$

其中 $\tau_1 = 3R_{dc1}C_1$, $\tau_2 = 3R_{dc1}C_1/N_1$ 。

令 $u_c(t) = U_{11}/N_1^2$ 得第一步所需时间约为

$$\Delta T_1 = 6R_{dc1}C_1N_1 \ln N_1 \quad (19)$$

令 $u_c(t) = U_{min}$ 得第二步所需时间约为

$$\Delta T_2 = \frac{6R_{dc1}C_1}{N_1} \ln \frac{U_{11}}{N_1 U_{min}} \quad (20)$$

整个不可控停机阶段最大电流值约为

$$i_{max} = U_{11} / (N_1 R_{dc1}) \quad (21)$$

可见放电电阻越大，最大电流就越小，放电时间越长，因此放电电阻的选择应该依据式(18)~式(20)，在保证最大电流值不超过 IGBT 限值情况下，使得放电时间尽可能合理。

2.3 启停控制流程

综上所述，模块化多电平换流器启停控制流程如图 6 所示。其中开关“1”和“0”分别代表开和关。Dblk_{NT} 和 Dblk_{dc} 分别代表 NTMMC 和 DCMC 的解锁信号，“1”和“0”分别代表相应换流站的解锁和闭锁。

3 MMC-HVDC 启停控制仿真

为了验证上述启停控制策略的有效性，搭建了如图 5 所示的 MMC-HVDC 系统模型。

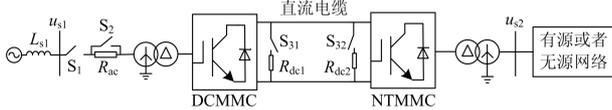


图 5 两端 MMC-HVDC 系统结构

Fig. 5 Structure of two-terminal MMC-HVDC system

3.1 两端有源网络启停控制仿真

两端有源网络的主要参数设置如表 2 所示。

表 2 两端有源网络仿真参数

Table 2 Simulation parameter of two-terminal active network

参数	数值	参数	数值
额定直流电压	24kV	桥臂电感值	10mH
额定有功功率	12MW	子模块电容值	12.5mF
交流线电压	10.5kV	额定子模块数	20(无冗余)
系统阻抗	0.5Ω	直流电压变化率	7.5kV/s
限流电阻	9Ω	放电电阻	2Ω/1Ω

3.1.1 启动控制

如图 7 所示为两端有源网络的 MMC-HVDC 系统启动仿真波形。 $t=0\sim 0.3s$ 属于不可控阶段， $t=0.3\sim 1.5s$ 属于直流电压可控阶段， $t=1.5\sim 2.5s$ 属于功率可控阶段。

$t=0\sim 0.3s$ 属于不可控阶段完成后，直流电压值约为交流线电压的幅值 14.8kV，同时修正后的电阻参数相比修正前能更好地抑制不可控阶段的最大电流。 $t=0.3s$ ，切除限流电阻，解锁 DCMC，对交流测有一定的冲击电流，正是这一电流使得直流电压可以继续上升至额定值。 $t=0.3\sim 1.5s$ 属于直流电压可控阶段，NTMMC 每相闭锁的子模块数逐渐减

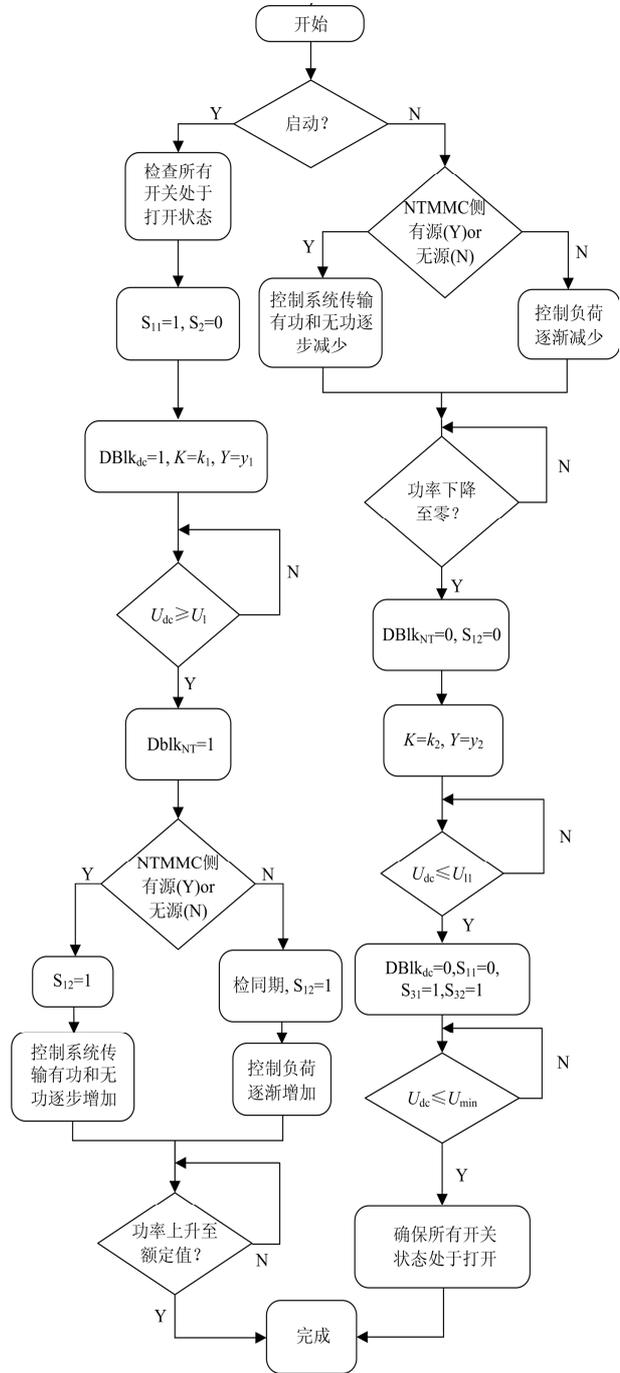
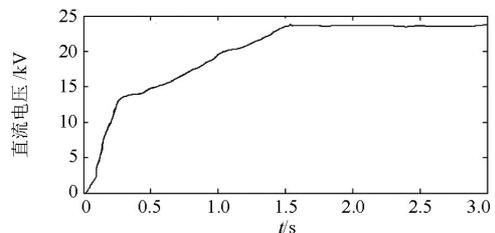


图 6 启停控制流程图

Fig. 6 Flow diagram of start/shutdown control



(a) DCMC 侧直流电压

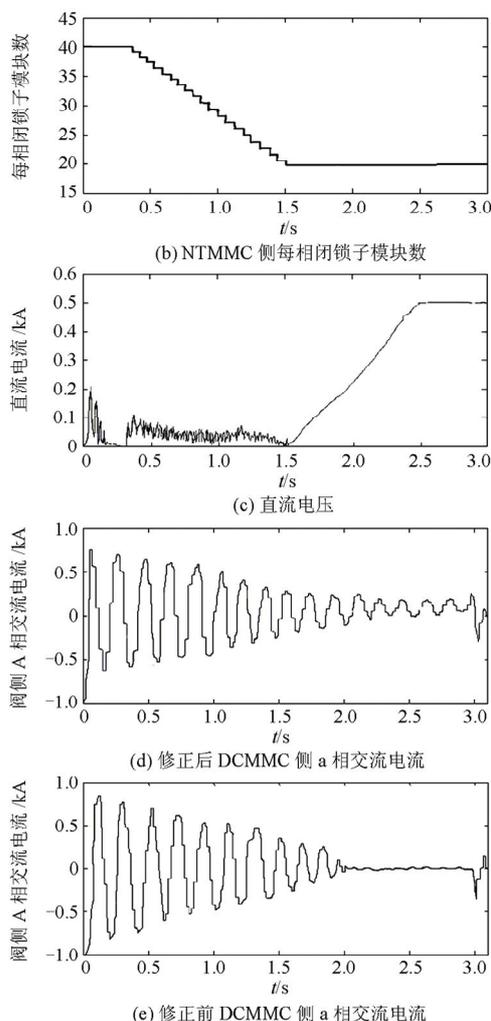


图 7 两端有源网络启动控制仿真结果

Fig. 7 Simulation results of start control for two-terminal active network

少至额定模块数, 直流电压线性上升为额定值, 此过程中的最大理论电压跌落值为 5%, 实际最大跌落值约为 4.8%, 理论与实际基本符合, 相比传统方法接近 50% 的直流电压跌落有了很大的改善。 $t=1.5\sim 2.5\text{ s}$ 属于功率可控阶段, 直流电流逐渐上升为额定值 0.5kA, 有功功率即变为额定值。

3.1.2 停机控制

如图 8 所示为两端有源网络的 MMC-HVDC 停机仿真波形。 $t=5\sim 6\text{ s}$ 属于功率可控阶段, $t=6\sim 7.2\text{ s}$ 属于直流电压可控阶段, $t=7.2\text{ s}$ 后属于不可控阶段。

$t=5\sim 6\text{ s}$ 属功率可控阶段, 有功功率以 12 MW/s 速率下降至零。 $t=6\text{ s}$, 闭锁 NTMMC, 断开交流侧开关 S_{12} 。 $t=6\sim 7.2\text{ s}$ 属直流电压可控阶段, 直流电压以 7.5 kV/s 逐渐降至交流线电压幅值, NTMMC 反馈能量至 DCMC 侧交流系统, NTMMC 能量反

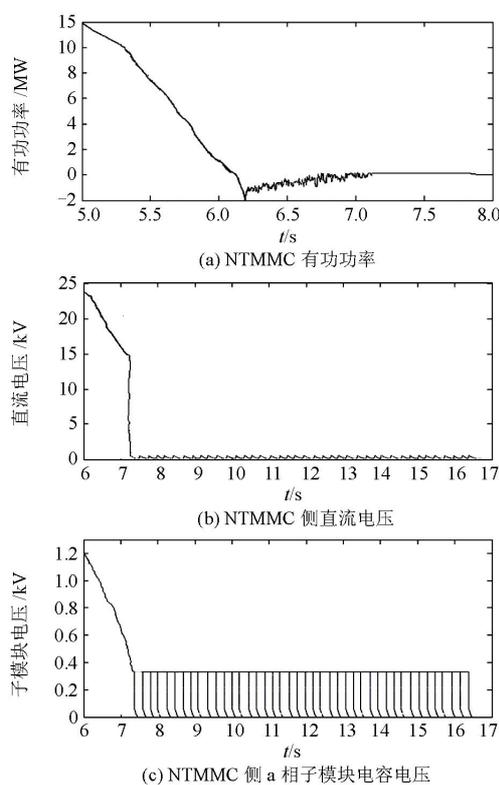


图 8 两端有源网络停机控制仿真结果

Fig. 8 Simulation results of start control for two-terminal passive network

馈比为 86.5%, 而传统方法能量反馈比只有 45.8%。 $t=7.2\text{ s}$ 闭锁 DCMC, 断开交流侧开关 S_{11} , 随后每个子模块轮流通过放电电阻进行放电至安全值 0.075 V 以下, 由于两侧交流断路器均已断开, 此时交流侧传输有功功率为 0。

3.2 一端无源网络启停控制仿真

鉴于本文启停控制策略应用于一端 MMC 应用于无源网络和两端有源网络时, 若系统参数设置相同, 除无源网络负荷不能连续线性变化, 只能做离散增加或者减少外, 其他仿真结果基本相同, 验证了提出的启停控制策略在无源网络应用中的有效性, 在此不再赘述。

4 结论

系统提出了模块化多电平换流器型直流输电系统(MMC-HVDC)的启停控制策略, 可应用于 MMC 连接有源或者无源网络场合。MMC-HVDC 的启动和停机控制是两个相反的过程, 本文将启动控制策略和停机控制策略均分为不可控、直流电压可控和功率可控三个阶段。

(1) 在不可控阶段, 修正了启动过程的限流电阻

参数, 提出了停机过程的放电电阻选取原则。仿真证明修正后的限流电阻参数可以更好抑制不可控阶段的最大充电电流。

(2) 在直流电压控制阶段, 采用子模块电容电压、投切数与直流电压协调控制方法, 计算出启动时的直流电压跌落值和停机时的能量反馈比。仿真结果说明采用此协调控制方法在启动时直流电压跌落小, 停机时反馈能量比高。

(3) 在功率控制阶段, 根据 MMC 应用于有源和无源网络控制策略的不同, 提出的相应策略均可以正常良好地工作。

参考文献

[1] 杨煜, 孙大卫, 谢小荣. 模块化多电平换流器型柔性直流系统的等效仿真方法比较[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 43-48.
 YANG Yu, SUN Dawei, XIE Xiaorong. Comparative study on the accelerated models of MMC-based VSC-HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 43-48.

[2] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
 JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.

[3] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 22-24.

[4] 周月宾. 模块化多电平换流器型直流输电系统的启停控制[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 204-209.
 ZHOU Yuebin. Start/stop control of modular multilevel converter based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 204-209.

[5] 孔明. 模块化多电平柔性直流输电换流器的预充电控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 67-73.
 KONG Ming. Pre-charging control strategies of modular multilevel converter for VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 67-73.

[6] 裘鹏. 一种新的柔性直流输电系统远端启动策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 100-105.

QIU Peng. A new remote start-up strategy for DC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 100-105.

[7] 冯明, 李兴源, 李宽, 等. 多端柔性直流输电系统启动控制及其仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 60-65.
 FENG Ming, LI Xingyuan, LI Kuan, et al. Control and simulation of VSC-MTDC start-up procedure[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 60-65.

[8] 唐庚. LCC-MMC 混合高压直流输电系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 302-310.
 TANG Geng. A LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 302-310.

[9] 薛英林, 徐政. 基于箝位双子模块的 MMC-HVDC 启动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 1-7.
 XUE Yinglin, XU Zheng. Start control for the MMC-HVDC system based on clamp double submodule[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 1-7.

[10] 李欢, 田新成, 张建坡, 等. 模块化多电平换流器改进型子模块拓扑仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 95-101.
 LI Huan, TIAN Xincheng, ZHANG Jianpo, et al. Simulating research of improved topologies of modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 95-101.

[11] 宋平岗, 李云丰, 王立娜, 等. MMC-HVDC 向无源网络供电的停机策略[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3247-3252.
 SONG Pinggang, LI Yunfeng, WANG Lina, et al. Capacitor coordinating pre-charging control strategy of MMC-HVDC[J]. Power System Technology 2013, 37(11): 3247-3252.

收稿日期: 2015-07-02; 修回日期: 2015-10-20

作者简介:

杨晓楠(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向柔性直流输电; E-mail: 944468831@qq.com

陈红坤(1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向电力系统运行与控制技术; E-mail: chkinsz@163.com

(编辑 张爱琴)