

基于控制模式平滑切换的离网直流变压器无扰并网策略

张伟明¹, 许加柱¹, 陈庆², 童国庆¹, 伍敏¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要:抑制离网直流变压器(DCT)并网所产生的冲击电流和电压振荡,可推动柔性直流电网的建设。给出DCT拓扑结构及控制模式,从DCT启动和控制模式切换2个方面来分析并网扰动形成的机理,其主要成因是电容充电和控制器输出信号跳变。针对控制器输出信号跳变的问题,分别提出了DCT控制模式平滑切换策略和光储系统控制模式平滑切换策略,通过控制模式的切换实现DCT控制与系统控制相协调,保证主从控制下的中/低压侧电压控制权归一者所有,并结合软启动方法,给出离网DCT无扰并网策略全过程。基于MATLAB/Simulink建立苏州两端型中/低压直流配电网模型,在不同并网工况仿真中,该策略均能有效抑制并网点的电压振荡和冲击电流,保证系统的稳定运行。

关键词:中/低压直流配电网;直流变压器;软启动;平滑切换;无扰并网策略

中图分类号:TM 41;TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202105004

0 引言

直流微电网的电压等级较低^[1],一般通过直流变压器(DCT)连接中压直流配电网^[2]。直流微电网既可以并网运行,也可以孤岛运行^[3],两者切换的实质是DCT的并、离网操作。由于中压直流配电网和低压直流微电网之间存在的电压等级差及功率不平衡问题,并网瞬间必然会产生扰动,如产生电压跌落、电压波动和冲击电流等^[4-6],严重的并网扰动会降低直流配电系统的电能质量并且影响系统正常运行。尤其是在配电网故障检修完成后进行并网恢复时,并网扰动还可能诱发系统二次故障,继电保护误动作等问题。在分布式电源扩建或故障恢复时,同样存在无扰并网的技术难题。

AC/DC换流器无扰并网策略主要分为单模式并网型^[7-9]和多模式切换并网型^[10-12]。单模式并网策略指换流器通过交直流系统混合充电,并网后功率控制解锁换流器,换流站只工作在一种控制模式下,扰动抑制方法主要在于充电策略的改进;多模式切换并网策略与单模式并网策略的区别在于换流站工作在多种控制模式下,并网扰动还包括模式切换所产生的扰动。上述研究主要基于多端柔性直流输电工程开展,且并网对象均为AC/DC换流器。

国内外关于DCT无扰并网策略的研究相对较少,主要针对DCT的软启动^[13-14]和运行模式切换^[15-16]进行研究。DCT软启动策略主要采用单移相^[13-14]、双移相^[17-18]以及三移相软启动^[19],单移相软启动策略是指同一时间只存在桥内移相角或桥间移

相角,启动过程分阶段完成;双移相软启动策略是指单个H桥的内移相角在 $[0, \pi]$ 范围内递增,外移相角同速率递增的方法;三移相软启动策略是在双移相的基础上再增加另一个H桥的内移相角。软启动只研究如何抑制DCT的启动电流,尚未考虑并网后DCT与系统的协调运行。DCT控制模式平滑切换的目的为抑制功率突变或移相角跳变^[15-16],但关于DCT中压控制和低压控制策略之间的切换并未给出具体方法,且以DCT为主换流站作为研究出发点。而在直流配电网中DCT一般为从站,DCT并网不仅需要考虑自身的模式切换,还需要与主网、微电网和分布式电源的控制策略相协调。

针对中/低压直流配电网中离网直流微电网经DCT并网产生扰动的问题,以苏州中/低压直流配电网拓扑为研究对象,建立低压直流微电网并网仿真模型。提出基于控制模式平滑切换的离网DCT无扰并网策略,考虑低压直流微电网和独立的光储系统经DCT并网的2种情形,并分别考虑并网点设置在中压侧和低压侧的2种工况。提出DCT控制模式平滑切换策略和光储系统控制模式平滑切换策略,分析从DCT软启动到控制模式切换的并网全过程。

1 中/低压直流配电网拓扑及控制

1.1 中/低压直流配电网正常运行分析

两端型中/低压直流配电网的拓扑见附录A图A1。中压直流配电网采用主从控制,模块化多电平换流站1(MMC₁)作为主站,运行于直流电压控制模式;模块化多电平换流站2(MMC₂)作为从站,运行于功率控制模式。光伏电池1(PV₁)、蓄电池以及负载组成直流微电网,微电网母线电压为 ± 375 V,通过DCT连接到 ± 10 kV的直流主网母线。PV₁接口换流器采用最大功率点跟踪(MPPT)控制;蓄电池通过双

收稿日期:2020-08-14;修回日期:2021-03-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904700)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2018YFB0904700)

向非隔离型DC/DC实现低压母线的电压控制；DCT运行于功率控制模式，实现主网与微电网间的潮流互动。光伏电池2(PV₂)与蓄电池构成光储系统，通过DCT接入±10 kV母线，前级Boost电路采用MPPT控制，后级DCT采用低电压控制。

1.2 双主动全桥拓扑及控制策略

DCT采用 n 个双主动全桥(DAB)单元输入串联输出并联组成，以减小电力电子器件的电流应力，其拓扑结构如图1所示。每个DAB由双H桥、高频变压器T、辅助电感 L 、稳压电容 C_{i1} 和 C_{o1} 构成。图中MV⁺、MV⁻和LV⁺、LV⁻分别表示中压正、负极母线和低压正、负极母线。

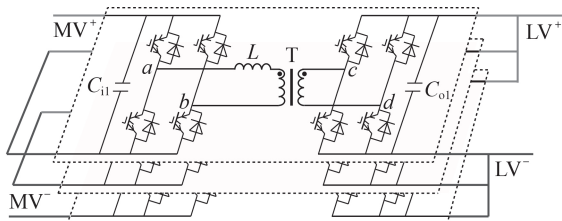


图1 DCT拓扑结构图

Fig.1 Topology structure diagram of DCT

DCT的3种控制模式为中压控制、低压控制和功率控制模式，总控制结构如图2所示。图中， U_{MV} 、 U_{LV} 和 i_{MV} 、 i_{LV} 分别为中压、低压母线电压和电流； U_{MV}^* 、 U_{LV}^* 和 i_{MV}^* 、 i_{LV}^* 分别为中压、低压母线电压和电流的参考值； k 为增益； Δi 为电流变化量；PI为比例积分控制器； S_1 — S_5 为开关； S_{11} 、 S_{14} 和 S_{21} 、 S_{24} 为单移相控制信号。记图2中的开关信号集合为 $S=\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ ： S_1 — S_4 的值为1表示开关闭合，值为0表示开关断开； S_5 的值为1表示开关闭合至上侧，值为0表示开关闭合至下侧。当 $S=\{1, 0, 0, 0, 1\}$ 时，DCT运行于中压控制模式，即低压侧电压恒定条件下，以中压侧电压为控制目标，潮流方向由负荷决定；当 $S=\{0, 1, 0, 1, 0\}$ 时，DCT运行于低压控制模式，即中压侧电压恒定条件下，以低压侧电压为控制目标，潮流方向由负荷决定；当 $S=\{0, 0, 1, 0, 1\}$ 或 $S=\{0, 0, 0, 1, 1\}$ 时，DCT运行于功率模式，即中压和低压侧电压均恒定，以功率为控制目标。

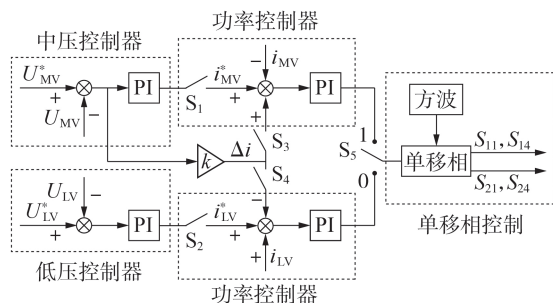


图2 DCT控制框图

Fig.2 Control block diagram of DCT

2 DCT并网扰动机理分析

2.1 DCT启动的扰动

DCT启动扰动形成的实质为电容的充电。DCT直接并网等同于母线电压直接加至电容 C 两端，由 $i_c = C du_c / dt$ (i_c 、 u_c 分别为充电电流、电容电压)可知，DCT并网瞬间存在很大的冲击电流。闭锁状态的DCT并网等效电路为典型二阶RLC零状态响应电路，求解可得：

$$i_c(t) = \frac{U_{dc}}{R_1} \left[e^{(-p_1 + p_2)t} - e^{-(p_1 + p_2)t} \right] \quad (1)$$

其中， U_{dc} 为直流母线等效电压； R_1 为线路等效电阻； p_1 和 p_2 为二阶RLC方程的特征根。当线路参数 $R_1^2 C_i^2 \gg 4L_1 C_i$ (L_1 为线路等效电感； C_i 为DCT等效输入电容)时， $p_1 \approx p_2$ ，充电电流最大值近似为 U_{dc}/R_1 。

由于电容电流 i_c' 等于电感电流 i_L ，电感电流平滑变化可等效为平缓充电电流^[18]，如式(2)所示。

$$i_L = \frac{u_{ab} \angle 0^\circ - u_{cd} \angle \phi}{j\omega L} \quad (2)$$

其中， u_{ab} 、 u_{cd} 为DAB两侧桥臂间电压； ϕ 为移相角； $\omega = 2\pi f$ 为角频率， f 为高频变压器的额定工作频率。启动瞬间 $u_{cd} = 0$ ，即 $i_L = u_{ab} / (j\omega L)$ 。

2.2 DAB控制模式切换的扰动

DCT的并网过程重点考虑控制模式的切换。DAB采用单移相控制，工作波形见附录A图A2。若忽略变压器电阻，根据基尔霍夫电流定律和电感能量守恒可得DAB输出功率^[16]为：

$$P = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_{ab} i_L(t) dt = \frac{n U_{MV} U_{LV} |d| (1 - |d|)}{2 f_s L} \quad (3)$$

其中， $d = \phi / \pi$ 为占空比； T_s 为H桥开关周期； f_s 为开关频率。

当低压控制和功率控制模式稳态运行时， U_{MV} 、 U_{LV} 、 f_s 基本不变，由式(3)可知DAB控制模式切换瞬间产生扰动的本质原因是控制器输出的移相角变化。当从低电压控制切换为功率控制时，若电流环给定的额定电流与电压环输出的电流参考值不一致，则电流环再次调节，输出移相角变化。

中压控制与低压控制之间的切换要求配合中压直流配电网和低压直流微电网的控制模式，避免出现母线电压长时间同时受控于主站MMC和DCT的情况。这种切换产生的扰动通常比较大，这一方面是因为控制器的输入量发生变化，另一方面是由于内外环PI控制器均要再次调节。在空载工况下，移相角为 ϕ_0 ，DAB虽然只传输损耗功率，但中/低压控制切换会导致功率反向，控制器输出移相角理论上从 ϕ_0 变为 $-\phi_0$ ，但在PI闭环控制下也可能从 ϕ_0 变为 $\phi_0 + \pi$ ，该变化过程会引起并网扰动。

在附录A图A2中，同一功率存在2个移相角

$\phi_a, \phi_b (\phi_b \in [\pi/2, \pi])$ 与之对应。 $t_2 - t_1, t_5 - t_3$ 越大,电感充放电时间越长,变压器一次、二次侧电压非标准方波部分越多,导致DAB输出的电压纹波较大。

2.3 光储系统控制模式切换的扰动

光储系统或低压直流微电网的并网过程不仅考虑将其直接接入直流电网,还需考虑并网后整个系统协调能力的恢复。光储系统并网前采用电压控制,并网后采用MPPT控制,2种控制下光伏输出功率不一定相等,若直接进行控制模式切换,可能导致母线电压波动。

当光储系统采用电压控制时,蓄电池处于恒压充电状态,忽略Boost电路的损耗,在离网状态下,光伏电池输出功率等于蓄电池的充电功率,因为光伏电池的电流和电压相互耦合,难以直接求得某一时刻光伏电池的输出功率。同时,考虑到蓄电池电压恒定,只要求得充电电流即可得到充电功率,即光伏电池输出功率。蓄电池的数学模型如式(4)所示^[20]。

$$V_{\text{bat}} = E_0 - K \frac{Q_{\text{bat}}}{Q_{\text{bat}} - \int_0^t i(\tau) d\tau} + A e^{-B \int_0^t i(\tau) d\tau} - i(t)R \quad (4)$$

其中, E_0 为内电动势; K 为极化电压; Q_{bat} 为额定容量; A 为指数区的电压暂降; B 为指数区容量的倒数; R 为内阻。令蓄电池电压 $V_{\text{bat}} = 750 \text{ V}$, t 取并网时间点,求解关于 $i(t)$ 的微分方程即可计算出蓄电池 t 时刻的充电功率,即 $P_{\text{bat}}(t) = i(t)V_{\text{bat}}$ 。

由光伏电池的功率特性曲线得到光伏电池的功率 P_{PV} ,进一步可得光储系统由电压控制切换至MPPT控制的功率差值为 $\Delta P = P_{\text{PV}} - P_{\text{bat}}$ 。

3 DCT无扰并网控制策略

3.1 扰动抑制方法

3.1.1 DAB软启动策略

DAB软启动是对电容限流充电的过程,具体方法为:输入端电容外接限流电路;输出端电容充电采用占空比与电压控制协调的软启动策略^[18]。

输出端的电容电流抑制可转化为抑制电感电流。半个周期内电感电流增量表达式为:

$$\Delta i_L = \frac{1}{L} \int_0^{T_s/2} (u_{ab} - u'_{cd}) dt \quad (5)$$

由式(5)可知,只要保证电感输入端电压 u_{ab} 的伏秒积等于输出端折算电压 u'_{cd} 的伏秒积即可抑制冲击电流。式(5)可改写为:

$$\int_0^{T_s/2} u_{ab} dt = \int_0^{T_s/2} u'_{cd} dt \quad (6)$$

为了避免控制器出现过大的超调量,DAB的输出电压参考值按函数 $u'_{cd}(t) = tU'_{LV}$ 缓慢上升, U'_{LV} 为低压侧折算电压,上升时间 $t_{\text{up}} \gg T_s$,故在 $[t, t + T_s/2]$ 内可以认为 u'_{cd} 近似不变。由式(6)求得:

$$d \frac{T_s}{2} U_{\text{MV}} = t \frac{T_s}{2} U'_{LV} \quad (7)$$

式(7)说明了占空比与输出电压协调控制的原理:当 $d=t$,即内移相角变化与给定斜波电压变化一致时,可实现 $\Delta i_L = 0$ 。软启动控制结构见附录A图A3。

3.1.2 DCT控制模式平滑切换策略

DCT实现控制模式平滑切换的关键是避免移相角跳变。由图2所示DCT控制框图可知电压控制器与功率控制有相同的电流环。当电压控制切换为功率控制时,在保持电流参考值不变的条件下共用电流内环,则PI调节器无需重新调节,避免移相角跳变。

中压控制器与低压控制器采样的电气量不同,因此外环并用、内环共用的方法并不适合这2种控制模式的切换。将光伏电池和直流微电网看作DCT的电源,则离网DCT再次并网前后瞬间都是运行在空载工况,电流内环参考值近似为0,这也说明空载并网可以避免电流内环的再次大幅度调节。同时,为避免移相角从 ϕ_0 缓慢变为 $\phi_0 + \pi$ 的过程,中压和低压控制模式切换后,给定补偿移相角 π ,同时,考虑到减少输出电压纹波,即要求 $\phi \in (-\pi/2, \pi/2)$ 。相同移相角下的低压控制和高压控制的开关信号波形如图3所示。

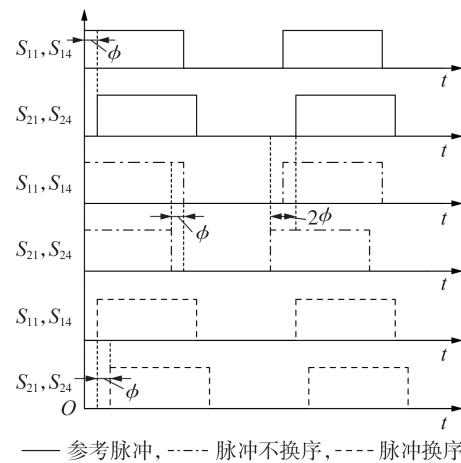


图3 中/低电压控制的脉冲信号波形

Fig.3 Pulse signal waveform of medium- and low-voltage control

空载工况下切换中/低电压控制模式,DCT内部电流方向改变,由图3可知交换两端H桥的脉冲信号可使移相角在区间 $(-\pi/2, \pi/2)$ 内,且等价于补偿移相角 π 。

3.1.3 光储系统控制模式平滑切换策略

光储系统控制模式平滑切换策略如图4所示。图中, U_{PV} 和 I_{PV} 分别为光伏电池的电压和电流; d_0 为MPPT控制的初始占空比; U_{PV}^* 为 U_{PV} 的参考值。电

压控制与功率控制的切换采用“内环共用”的平滑策略,再通电流内环提升功率至MPPT控制的初始设定值。功率控制只是替代了MPPT控制从小功率开始调节的过程,两者切换并不会产生明显的扰动。此外,为避免计算电压控制的光伏电流值,采用PI自闭环结构电流保持器维持运行模式切换瞬间的光伏电流值。

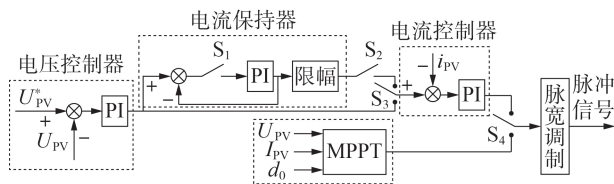


图4 光储系统控制模式平滑切换策略结构图

Fig.4 Structure diagram of smooth switching strategy of PV and battery system control mode

3.2 直流微电网经DCT无扰并网策略

无源状态的DCT根据启动电源的不同,可以将中压或低压母线设置为DCT的并网点,2种情形的无扰并网策略大同小异。初始状态下中压直流配电网及孤岛下的低压直流微电网正常运行,且离网DCT闭锁。直流微电网经DCT无扰并网策略流程图如附录A图A4所示。下面具体给出并网点分别设置在中压侧和低压侧的DCT无扰并网策略的步骤:①DCT若以低压直流微电网作为启动电源,则闭合低压侧直流断路器,反之,闭合中压侧直流开关;②待DCT输入端电容限流充电完成后,短路限流电阻,采用占空比与电压控制协调策略完成软启动;③待DCT输出电压稳定后,若启动电源为低压系统,则闭合中压直流断路器,反之,闭合低压直流断路器;④DCT由中/低电压控制模式切换为功率控制模式,功率按斜坡函数上升。

在DCT并网的全过程中,为保护正常运行的系统需要时刻监视并网点电压及电流的变化,一旦并网后出现冲击电流或母线电压严重波动的问题,应立即断开DCT中、低压侧的断路器。值得注意的是低压直流微电网母线电压始终由蓄电池采用电压控制维持。若微电网母线电压并网后由DCT维持,则要求蓄电池并网时将电压控制切换为恒流充、放电控制,该情景下DCT一旦并网失败,蓄电池的控制模式又要切换回电压控制,这势必影响直流微电网的正常运行。

3.3 光储系统经DCT无扰并网策略

光储系统与直流微电网的情形相同,DCT的并网点可设置于中压或低压母线,但这2种情形下的无扰并网策略因光伏电池的并网前、后控制模式切换而不尽相同。并网点分别设置在中压和低压侧的DCT无扰并网策略流程如附录A图A5所示。

3.3.1 光储系统经DCT中压侧无扰并网策略

设初始状态为中压直流配电网稳定运行以及离网DCT闭锁。下面具体给出并网点分别设置在中压和低压侧的DCT无扰并网策略:①光储系统采用直流电压控制,建立稳定的750 V电压;②闭合低压直流断路器,投入限流电阻对低压侧电容充电;③待直流电容充电完成后,采用占空比与低压控制协调策略软启动DCT;④待DCT稳定输出10 kV电压后,闭合中压直流断路器;⑤DCT控制模式切换为低电压控制,交换H桥触发脉冲,同时,光储系统由输出电压控制切换为功率控制,将PI自闭环跟踪器输出作为光伏电池电流参考值,并保持到750 V电压稳定;⑥待DCT可靠控制750 V电压后,缓慢提升光伏电池电流参考值;⑦待光伏电池电流 $I_{PV} = I_{MPP}$ (I_{MPP} 为MPPT控制跟踪的电流值)时,光储系统控制模式切换为MPPT控制。

3.3.2 光储系统经DCT低压侧无扰并网策略

光储系统经DCT低压侧无扰并网的初始条件与其经DCT中压侧并网时相同,下面说明其余步骤:①与光储系统经DCT中压侧并网时的启动环节相同;②闭合DCT中压直流断路器,投入限流电阻对中压侧电容充电;③待电容完成充电,采用占空比与中压控制协调软启动DCT;④待DCT稳定输出750 V电压,闭合低压直流断路器;⑤完成合闸操作后,光储系统切换功率控制,电流参考值由电压外环断开瞬间的输出值缓慢上升为 I_{MPP} ;⑥与3.3.1节光储系统经DCT中压侧无扰并网的步骤⑦相同。

4 DCT无扰并网控制策略仿真

为验证本文所提的DCT无扰并网策略的有效性,以附录A图A1所示中/低压直流配电网进行仿真,仿真模型见附录A图A6。控制参数、变流器及系统容量参数分别见附录B表B1—B3,并与传统并网方法进行比较,直流微电网及光伏经DCT的传统并网策略分别见附录C图C1、C2。

4.1 直流微电网经DCT中/低压侧无扰并网策略仿真

设直流微电网经DCT中压侧和低压侧并网2种场景,并设置传统并网策略和基于控制模式平滑切换的并网策略2种工况。重点分析直流微电网经DCT中压侧无扰并网策略仿真,直流微电网经DCT低压侧无扰并网策略仿真分析见附录D。

根据附录A图A4所示直流微电网经DCT中压侧无扰并网策略进行仿真,具体时序如下:① $t_0 = 0$,闭锁DCT;② $t_1 = 0.5$ s,闭合低压侧直流隔离开关组DCDS₃和DCDS₄;③ $t_2 = 1.2$ s,闭合低压侧直流断路器DCCB₃和DCCB₄,同时解锁DCT,进行软启动;④ $t_3 = 2.4$ s,闭合中压侧直流断路器DCCB₁和DCCB₂,同时

DCT运行模式切换为功率控制,中压侧电流给定斜率上升至50 A。

图5(a)为直流微电网经DCT中压侧并网时传统并网策略和本文所提并网策略的中/低压直流母线电压波形。在 $[0.5, 0.8]$ s时,DCT低压侧电容限流充电,2种策略下 U_{LV} 均出现约为17 V的电压暂降。在1.2 s时,传统策略下DCT采用电压斜率启动,在启动瞬间, U_{LV} 出现最大降幅为13 V的跌落,而本文方法能够抑制启动瞬间的电压扰动。在 $(1.2, 2.2)$ s时, U_{MV} 按指令上升到20 kV。在 $[2.2, 2.4)$ s时,在DCT的2种并网策略下 U_{LV} 均出现最大增幅为6 V的电压暂升,此时DCT启动采用电压电流双环控制结构,电压上升过程中电压一直处于响应阶段,电流参考信号在外环的积分作用下持续增大,当电压达到稳定值后,电压外环快速调节至稳态,电流参考信号瞬间跌落到稳态值,电压直流微电网输出功率降低,母线电压上升。在2.4 s时,传统策略采用额外的电流控制器, U_{MV} 出现约为50 V的电压波动,本文策略采用“内环共用”方法,避免了DCT运行模式切换时电流环的再次调节,确保 U_{MV} 稳定。在 $(2.4, 2.9]$ s时,中压配电网注入有功, U_{LV} 出现约为15 V的电压暂降,随后迅速恢复到750 V。

图5(b)为直流微电网经DCT中压侧并网时传统并网策略和本文所提并网策略的中/低压直流母

线电流波形。在0.5 s时,DCT低压侧电容充电电流峰值约为180 A;在1.2 s时,传统策略下的 I_{LV} 在DCT启动瞬间出现约为140 A的冲击;在2.2 s时,2种策略下的 I_{LV} 均出现跌落,与图5(a)所示电压暂升相对应;在2.4 s时,传统策略下的 I_{MV} 和 I_{LV} 均发生跌落,而采用本文策略时两侧电流均平滑过渡。

4.2 光储系统经DCT中/低压侧无扰并网策略仿真

同样设光储系统经DCT中压侧和低压侧并网2种场景,并设传统并网策略和基于控制模式平滑切换的并网策略2种工况。重点分析光储系统经DCT中压侧无扰并网策略仿真,光储系统经DCT低压侧无扰并网策略仿真分析见附录E。

根据附录A图A5的光储系统经DCT中压侧无扰并网策略进行仿真,具体时序如下:① $t_0=0$,闭锁DCT;② $t_1=0.5$ s,闭合DCT低压侧直流隔离开关组DCDS₇和DCDS₈;③ $t_2=1.1$ s,闭合DCT低压侧直流断路器DCCB₇和DCCB₈,解锁DCT的中压控制;④ $t_3=2.4$ s,闭合DCT中压侧直流断路器DCCB₅和DCCB₆,DCT由中压控制切换为低压控制,光储系统由电压控制切换为功率控制,电流跟踪器赋初始值给功率控制器,功率的斜率上升至1 MW;⑤ $t_4=2.95$ s,光储系统由功率控制切换至MPPT控制。

图6(a)为光储系统经DCT低压侧并网时传统并网策略和本文所提并网策略的中/低压直流母线电压波形图。在0.5~2.4 s时, U_{MV} 和 U_{LV} 的变化趋势与直流微电网并网时一致。在2.4 s时,传统策略下的 U_{LV} 瞬间跌落到720 V,并由于控制器的调节而发生波动,且 U_{MV} 出现1000 V电压跌落,并由于线路的平波电抗器和DCT的稳压电容而发生欠阻尼振荡;相较之下,本文采用DAB平滑切换控制,在2.4 s时低压母线电压未出现明显波动。在2.95 s时,传统策略下的光伏接口换流器由电压控制直接切换为MPPT控制, U_{LV} 跃变为775 V;而本文采用光伏平滑切换控制, U_{LV} 随着电流指令的缓慢上升而上升。在2.95 s时,本文策略下光储系统的电流控制切换为MPPT控制, U_{LV} 快速调节为光伏最大功率输出时的稳态电压值,该值不为额定750 V的原因是DCT低压侧端口电压由DCT控制稳定在750 V,此时光伏向DCT传输功率,线路阻抗的存在导致光伏电池接口换流器的输出电压等于750 V加上线路压降。在3.4~3.6 s时,由局部放大图可以看出,传统策略下的 U_{MV} 比本文采用的控制切换加换序策略下的 U_{MV} 要大2倍以上。

图6(b)为光储系统经DCT中压侧并网时传统并网策略和本文所提并网策略的中/低压直流母线电流波形图。在1.1 s时,传统方法下 I_{LV} 出现约为200 A的电流冲击,占空比与电压控制协调的软启动策略下 I_{LV} 未出现冲击电流。在2.4 s时,传统策略下

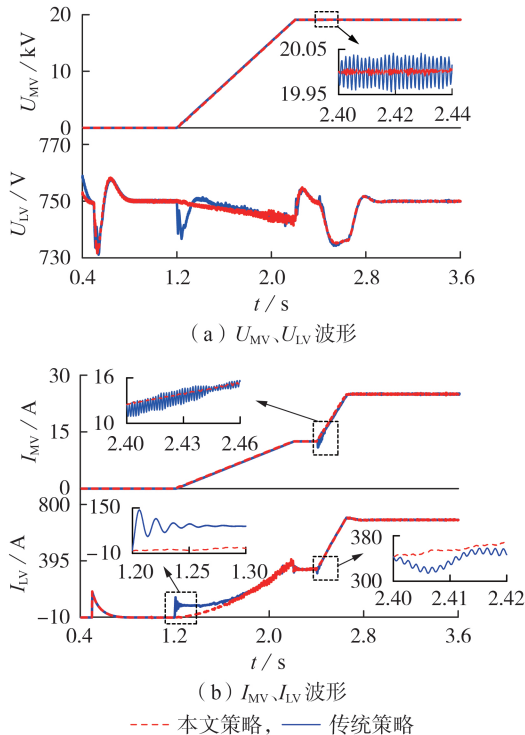


图5 直流微电网经DCT中压侧并网的中/低压侧直流母线电压、电流波形

Fig.5 Voltage and current waveforms of medium- and low-voltage DC bus when DC microgrid is in connection with DCT medium-voltage side

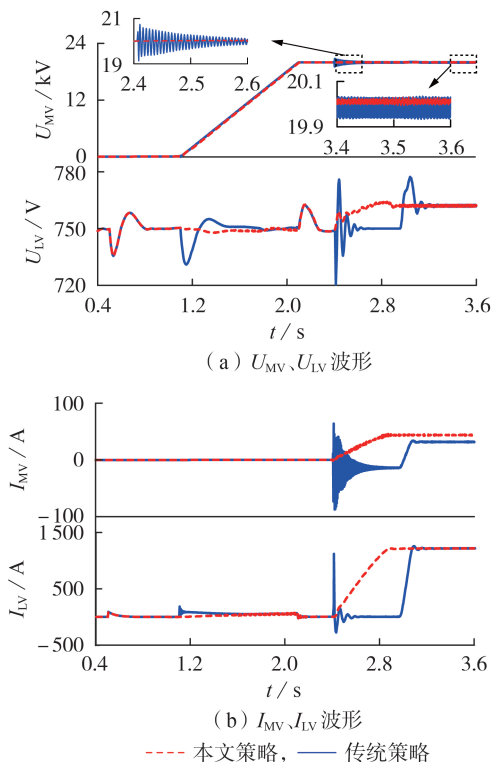


图6 光储系统经DCT中压侧并网的中/低压侧直流母线电压、电流波形

Fig.6 Voltage and current waveforms of medium- and low-voltage DC bus when PV and battery system is in connection with DCT medium-voltage side

I_{MV} 和 I_{LV} 均出现电流跃变,而本文策略下 I_{LV} 未出现明显扰动, I_{MV} 出现幅值为 1.5 A 的波动,证明了 DAB 平滑切换策略的有效性。在 2.95 s 时,传统策略下 I_{MV} 和 I_{LV} 均出现波动,而本文策略下 I_{MV} 和 I_{LV} 几乎没有出现波动,证明了光伏电池平滑切换策略的有效性。

5 结论

(1) 本文从 DCT 启动和运行模式切换 2 个方面分析得到 DCT 并网扰动形成机理,其关键是 DCT 稳压电容的充电和控制器输出移相角的变化。

(2) 针对 DCT 电容充电问题,采用双移相软启动策略能有效控制充电电流;针对 DCT 和光伏运行模式切换的控制信号跳变问题,分别采用 DCT 和光储系统控制模式平滑切换策略,实现控制信号的平滑过渡。

(3) 基于苏州中/低压直流配电网工程拓扑,建立 MATLAB/Simulink 仿真模型,提出基于控制模式平滑切换的离网 DCT 无扰并网策略,仿真验证了该策略在直流微电网和光储系统经 DCT 并网情形下的有效性。

本文所研究的并网策略对未来中/低压柔性直流配电系统中直流微电网和分布式电源无扰动接入中压配电网有一定的参考价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李霞林,郭力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):2-17.
LI Xiaolin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [2] 梅军,管州,丁然,等. 直流配电网 MMC-H 型直流变压器回流功率的变频优化[J]. 电力自动化设备,2020,40(2):14-20.
MEI Jun, GUAN Zhou, DING Ran, et al. Variable-frequency optimization strategy based on backflow power of MMC-H DC transformer in DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 14-20.
- [3] 陈安伟. 多母线结构交直流混合微电网协调控制与模式切换策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(17):175-183.
CHEN Anwei. Coordination control and mode switching strategy for hybrid AC/DC microgrid with multi-bus structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 175-183.
- [4] 季一润,袁志昌,赵剑锋,等. 一种适用于柔性直流配电网的电压控制策略[J]. 中国电机工程学报,2016,36(2):335-341.
JI Yirun, YUAN Zhichang, ZHAO Jianfeng, et al. A suitable voltage control strategy for DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 335-341.
- [5] 于亚男,金阳析,江全元,等. 基于 RT-LAB 的柔性直流配电网建模与仿真分析[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(19):125-130.
YU Yanan, JIN Yangxin, JIANG Quanyuan, et al. RT-LAB based modeling and simulation analysis of flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 125-130.
- [6] 张海涛,王辉,岳伟,等. 多端柔性直流输电系统中停运换流站再并列方法[J]. 南方电网技术,2014,8(6):48-52.
ZHANG Haitao, WANG Hui, YUE Wei, et al. Re-parallelizing method of shut-down converter stations in MMC-MTDC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 48-52.
- [7] 韩乃峥,贾秀芳,许建中,等. 孤立 MMC 站在线平滑接入直流电网的控制策略[J]. 电网技术,2018,42(3):804-813.
HAN Naizheng, JIA Xiufang, XU Jianzhong, et al. Strategy on online smooth connection of an isolated MMC station into DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 804-813.
- [8] WANG Y Z, YUAN Z C, FU J. A novel strategy on smooth connection of an offline MMC station into MTDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 568-574.
- [9] LI Y L, SHI X J, LIU B, et al. Development, demonstration, and control of a testbed for multiterminal HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(8): 6069-6078.
- [10] 韩乃峥,贾秀芳,许建中,等. 无源 MMC 站通过 DC/DC 变换器在线平滑接入直流电网的控制策略[J]. 电力建设,2018,39(5):28-37.
HAN Naizheng, JIA Xiufang, XU Jianzhong, et al. Control strategy for on-line smooth connection of passive modular multi-level converter station via DC/DC converter into DC grid[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(5): 28-37.
- [11] 文安,邓旭,魏承志,等. 柔性直流输电系统交直流并列运行与孤岛运行方式间的切换控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):99-106.
WEN An, DENG Xu, WEI Chengzhi, et al. Switching control between AC-DC parallel and islanded operations of VSC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment,

- 2014, 34(7):99-106.
- [12] 曹亮,房鑫炎,罗文斌. 船岸一体化系统中岸电无缝接入与功率优化方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6):185-191.
CAO Liang, FANG Xinyan, LUO Wenbin. Seamless connection and power optimization of shore power in ship-shore integrated system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6):185-191.
- [13] DE-DONCKER R W, DIVAN D M, KHERALUWALA M H. A three-phase soft-switched high power density DC/DC converter for high power applications[C]//Conference Record of the 1988 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 1988:796-805.
- [14] GIULIANI F, DELMONTE N, COVA P, et al. Soft-starting procedure for dual active bridge converter[C]//2015 IEEE 16th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2015:1-6.
- [15] 李俊杰, 吴在军, 杨士慧, 等. 交直流混合微电网中电力电子变压器功率控制与模式切换方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(8):82-87, 110.
LI Junjie, WU Zaijun, YANG Shihui, et al. Power control and mode switching method of power electronic transformer in AC/DC hybrid microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8):82-87, 110.
- [16] 李俊杰, 吕振宇, 吴在军, 等. 基于电力电子变压器的交直流混合微电网运行模式自适应切换策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10):126-131, 138.
LI Junjie, LÜ Zhenyu, WU Zaijun, et al. Adaptive switching strategy of AC/DC hybrid microgrid operating mode based on power electronic transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10):126-131, 138.
- [17] 曲平, 李子欣, 宋鹏先, 等. 隔离式双向全桥 DC-DC 变换器预充电研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊1):320-325.
QU Ping, LI Zixin, SONG Pengxian, et al. Pre-charge strategy study for isolated dual active bridge DC-DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(Supplement 1):320-325.
- [18] 潘羿威, 袁帅, 陈阿莲, 等. 一种应用于直流配电网的隔离直流变换器软启动方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(4):37-42.
PAN Yiwei, YUAN Shuai, CHEN Alian, et al. A soft starting method for the isolated DC/DC converter in DC distribution systems[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2017, 47(4):37-42.
- [19] 侯赓, 宋文胜. 全桥隔离 DC/DC 变换器的三重相移控制及其软启动方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23):6113-6121.
HOU Nie, SONG Wensheng. Full-bridge isolated DC/DC converters with triple-phase-shift control and soft starting control method[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23):6113-6121.
- [20] 郑树辉. 光储交流微电网的运行控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
ZHENG Shuhui. Research on operation control strategy of AC microgrid with PV and energy storage systems[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.

作者简介:



张伟明

张伟明(1999—),男,广东罗定人,硕士研究生,主要研究方向为直流配电系统控制与电能变换(**E-mail**:zhang_weiming_edu@163.com);

许加柱(1980—),男,安徽滁州人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为交直流电能变换新技术(**E-mail**:xujiazhu@126.com);

陈庆(1962—),男,江苏徐州人,研究员级高级工程师,主要研究方向为电力系统生产管理(**E-mail**:dgg6289@sohu.com)。

(编辑 王欣竹)

Undisturbed grid-connected strategy of offline DC transformer based on smooth switching of control modes

ZHANG Weiming¹, XU Jiazhu¹, CHEN Qing², TONG Guoqing¹, WU Min¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Suppressing the inrush current and voltage fluctuation caused by offline DCT (DC Transformer) grid-connection can promote the construction of flexible DC grids. The topology of the DCT and its control modes are given. The forming mechanism of the grid-connected disturbance is analyzed from two aspect of DCT start and control mode switching, and the main reasons are the capacitor charging and the output signal jumping in controller. For the problem of output signal jumping in controller, the smooth switching strategy of DCT control modes and the smooth switching strategy of PV (PhotoVoltaic) and battery system control modes are respectively proposed. DCT control is coordinated with system control through the switching of the control modes, ensuring that the control rights of bus voltage in medium- and low-side under the master-slave control are owned by one. Combined with the soft-start method, the whole process of undisturbed grid-connected strategy of offline DCT is given. Finally, Suzhou medium- and low-voltage DC distribution network model is established based on MATLAB/Simulink. In the simulation of different grid-connected conditions, the proposed strategy can effectively suppress the voltage fluctuation and inrush current at the grid-connected point and ensure the stable operation of system.

Key words: medium- and low-voltage DC distribution network; DC transformer; soft-start; smooth switching; undisturbed grid-connected strategy

附录 A

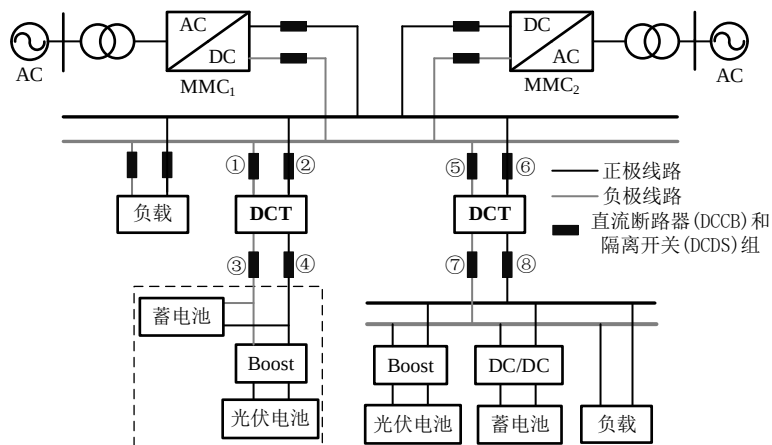


图 A1 两端型中/低压直流配电网拓扑

Fig.A1 Topology of two-terminal medium- and low-voltage DC distribution network

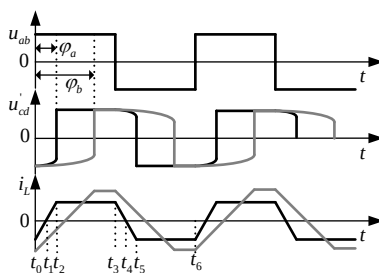


图 A2 单移相控制的 DAB 电压、电流波形

Fig.A2 Voltage and current waveforms of DAB with single phase shift control

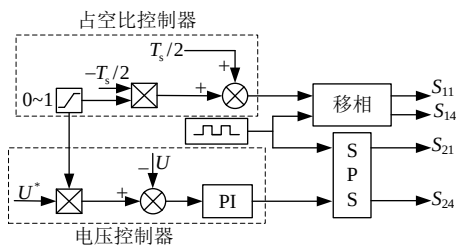


图 A3 占空比与电压控制协调的软起动策略

Fig.A3 Soft-start strategy with duty cycle and voltage control coordination

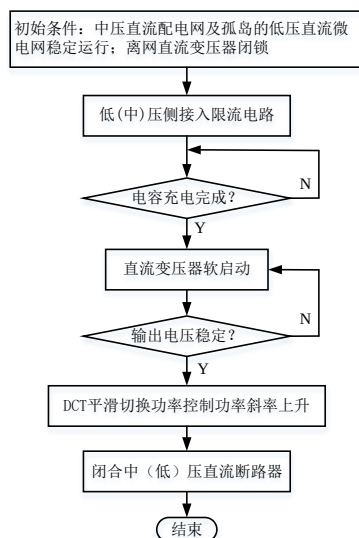


图 A4 直流微电网经 DCT 无扰并网策略流程图

Fig.A4 Flowchart diagram of undisturbed grid-connected strategy of DC microgrid through DCT

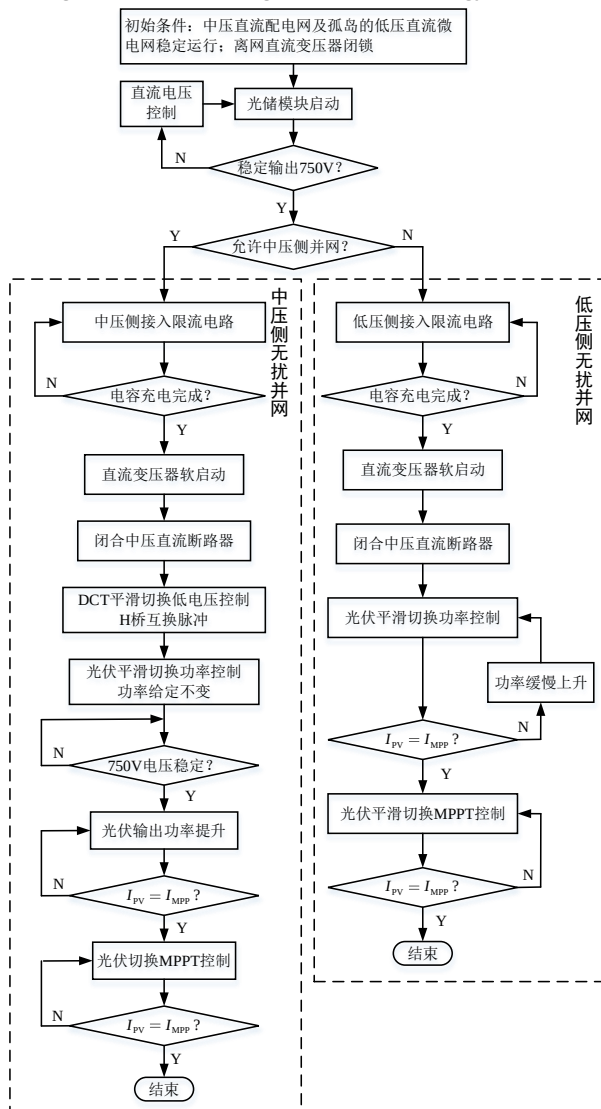


图 A5 光储系统经 DCT 无扰并网策略流程图

Fig.A5 Flowchart diagram of undisturbed grid-connected strategy of PV and battery system through DCT

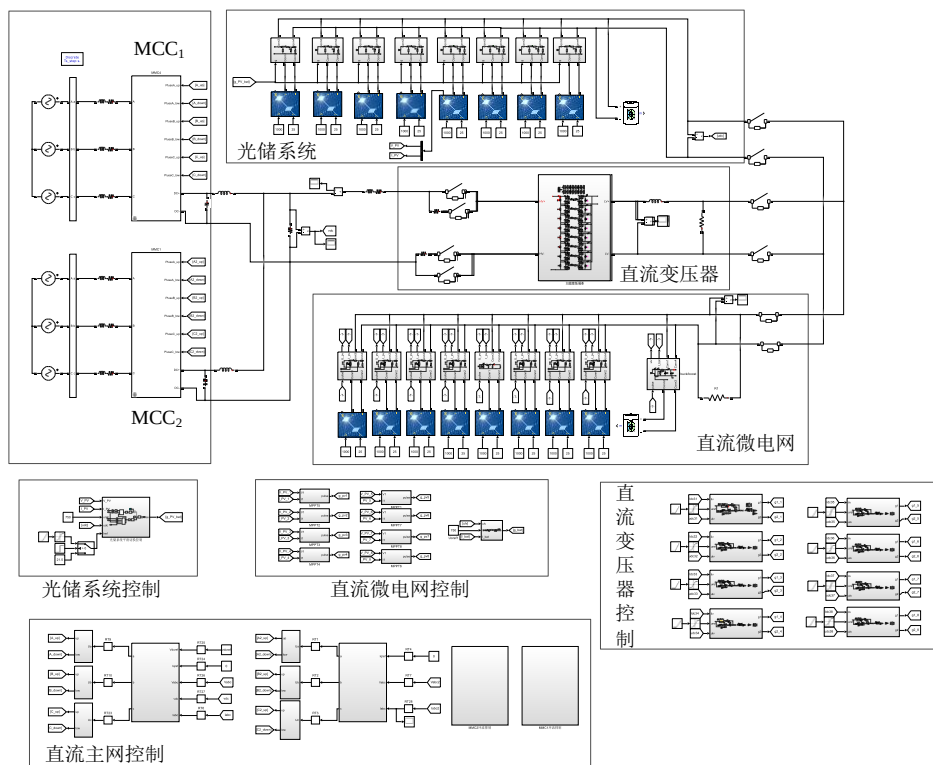


图 A6 仿真模型图

Fig.A6 Diagram of simulation model

附录 B

表 B1 控制系统 PI 参数

Table B1 PI parameters of control system

电路类型	电压环		电流环		均压环		电流保持器	
	K_{vp}	K_{vi}	K_{ip}	K_{ii}	$K_{ave, p}$	$K_{ave, i}$	$K_{bc, p}$	$K_{bc, i}$
DCT	1.6	48.7	0.012	12.5	8	0	—	—
Boost	0.1	10	4.2	43	—	—	0.5	35
Buck/Boost	2.5	120	2.8	180	—	—	—	—

表 B2 变流器参数

Table B2 Parameters of converter

电路类型	交流电压/kV	直流电压/kV	换流器容量/(MV·A)
DCT	10	20	10.5
Boost	—	20/0.75	1
Buck/Boost	—	0.75	1
Boost	—	0.75	0.125

表 B3 系统容量参数

Table B3 Capacity parameters of system

参数	参数值	参数	参数值
中压侧负荷容量/(MV·A)	10	光伏最大功率/(MV·A)	0.126
低压侧负荷容量/(MV·A)	0.787	储能容量/(A·h)	530

附录 C

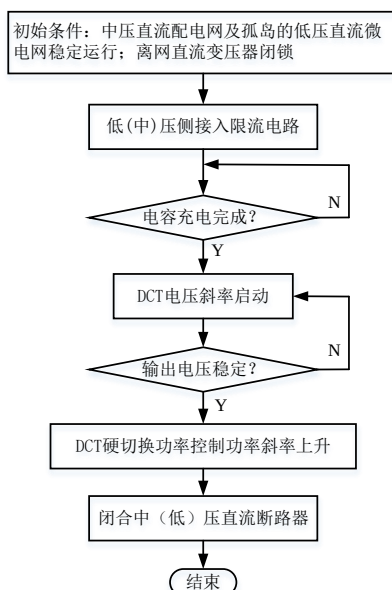


图 C1 直流微电网经 DCT 传统并网策略流程图

Fig.C1 Flowchart diagram of traditional grid-connected strategy of DC microgrid through DCT

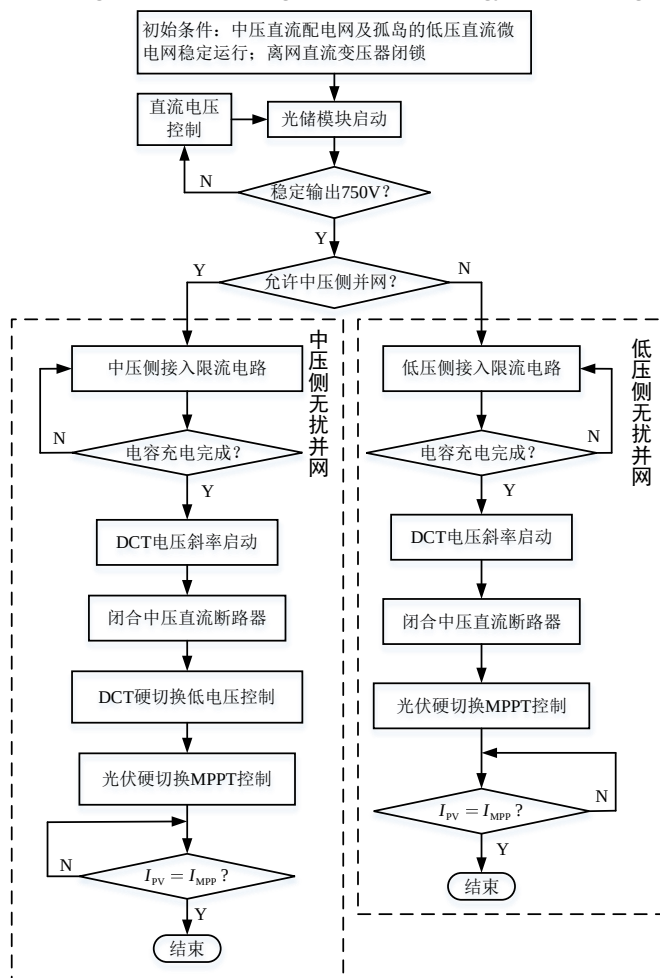


图 C2 光储系统经 DCT 传统并网策略流程图

Fig.C2 Flowchart diagram of traditional grid-connected strategy of PV and battery system through DCT

附录 D

根据附录 A 图 A4 的直流微电网经 DCT 低压侧无扰并网策略进行仿真，具体的时序设置如下：① $t_0 = 0$ ，闭锁 DCT；② $t_1 = 0.5$ s，闭合中压侧直流隔离开关组 DCDS₁ 和 DCDS₂；③ $t_2 = 1.1$ s，闭合中压侧直流断路器 DCCB₁ 和 DCCB₂，解锁 DCT 的 LV 电压控制；④ $t_3 = 1.4$ s，闭合低压侧直流断路器 DCCB₃ 和 DCCB₄，同时 DCT 运行模式切换为功率控制，低压侧电流给定由 0 斜率上升至 667 A。

图 D1 (a) 为 DCT 低压侧并网时传统并网策略和本文所提并网策略的中/低压直流母线电压波形图。DCT 低压侧并网的电压总体变化规律与中压侧并网情形相似，选取典型的 3 个时间段分析低压侧并网的母线电压扰动。在 0.5~1.0 s 时， U_{MV} 发生暂降，并在短时间内由 MMC 主站调节恢复到 20 kV。在 1.1 s 时，斜率电压启动的 U_{MV} 在 DCT 启动瞬间跌落 10 V，相较之下，占空比与电压控制协调的软启动的 U_{MV} 能稳定维持在 20 kV。在 1.4 s 时，DCT 切换运行模式，传统控制的 U_{LV} 出现 20 V 的扰动，而采用平滑切换控制能分别实现 U_{MV} 和 U_{LV} 的无缝衔接。

图 D1 (b) 为 DCT 低压侧并网时传统并网策略和本文所提并网策略的中/低压直流母线电流波形图。在 1.0 s 时， I_{MV} 出现最大幅值为 4 A 的波动，这是由并网点电压差造成的。在 1.1 s 时，斜率电压启动的 I_{MV} 最大突变幅值达到 12 A，而采用占空比与电压控制协调的软启动则实现 I_{MV} 的平滑过渡。在 1.4 s 时，传统方法 I_{LV} 由 377 A 跌落为 350 A，本文方法 I_{LV} 只出现了约为 7 A 的跌落，证明了平滑切换控制的有效性。

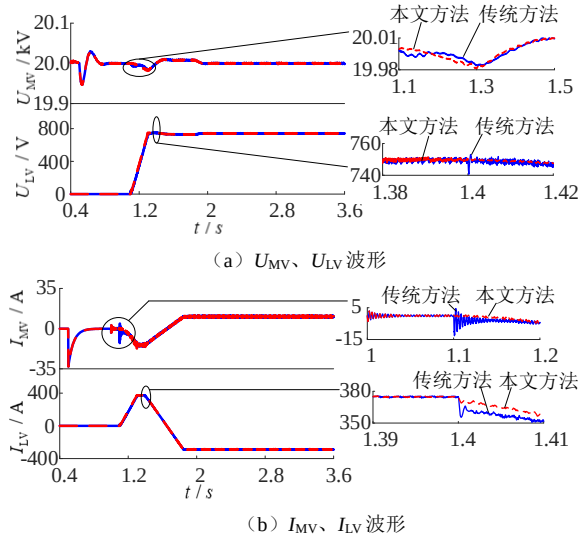


图 D1 直流微电网经 DCT 低压侧并网的中/低压侧直流母线电压、电流波形

Fig.D1 Voltage and current waveforms of medium- and low-voltage DC bus when DC microgrid is in connection with DCT low-voltage side

附录 E

根据附录 A 图 A5 的光储系统经 DCT 低压侧无扰并网策略进行仿真，具体的时序设置如下：① $t_0 = 0$ ，闭锁 DCT；② $t_1 = 0.5$ s，闭合 DCT 中压侧直流隔离开关组 DCDS₅ 和 DCDS₆；③ $t_2 = 1.0$ s，闭合 DCT 中压侧直流断路器 DCCB₅ 和 DCCB₆，解锁 DCT 的 LV 母线电压控制；④ $t_3 = 1.4$ s，闭合 DCT 低压侧直流断路器 DCCB₇ 和 DCCB₈，同时光伏电池由电压控制切换为功率控制；⑤ $t_4 = 2.0$ s 光伏功率控制切换为 MPPT 控制。

DCT 并网点设置在中压侧时 DCT 这 2 种并网策略下中/低压直流母线电压波形。在 1.4 s 时，传统方法下光伏直接由电压控制切换为 MPPT 控制，此时 U_{MV} 出现 75 V 的电压跃变；本文的无扰并网策略下 U_{MV} 几乎未出现电压波动。传统方法的功率上升时间段为 1.4~1.6 s，其 U_{MV} 电压暂升幅值为 80 V， U_{LV} 电压暂升幅值为 17 V；本文方法的功率上升时间段为 1.4~1.9 s，由于采用光伏电流控制，输出电流按指令缓慢上升，减少对 U_{MV} 和 U_{LV}

的干扰，其 U_{MV} 最大电压暂升幅值为 20 V， U_{LV} 最大电压暂升幅值为 5 V，在 2.0 s 后，光伏电流控制切换为 MPPT 控制， U_{MV} 和 U_{LV} 均为发生明显的扰动。在 1.3~2. s 时，从本文所提策略下的 U_{LV} 局部放大图可以看出光伏系统平滑切换策略能有效抑制 Boost 模式切换引起的扰动。

图 E1 (a) 为 DCT 并网点设置在中压侧时 DCT 的 2 种并网策略下中/低压直流母线电流波形。在 1.0 s 时，图传统方法采用电压斜率启动，中压侧电流出现 10 A 的突变，同时由于线路的平波电抗器和 DCT 稳压电容的存在而发生欠阻尼振荡；采用占空比与电压控制协调的软启动时， I_{MV} 只出现 2 A 的振荡，较电压斜率启动降低了 80%。在 1.5 s 时，传统方法的 I_{MV} 和 I_{LV} 均出现超调且要 0.2 s 后才能稳定；在 1.9 s 时，本文方法下的光伏电流达到额定值，由于上升过程比较缓和，所以不会出现明显的电流超调。

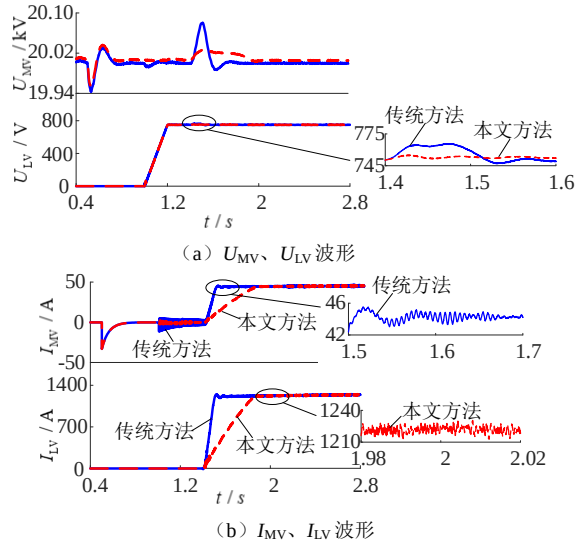


图 E1 光储系统经 DCT 低压侧并网的中/低压侧直流母线电压、电流波形

Fig.E1 Voltage and current waveforms of medium- and low-voltage DC bus when PV and battery system is in connection with DCT low-voltage side