

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190268

## 三端星型柔性直流配电系统的启停、协调控制

陈锐<sup>1</sup>, 宋伟伟<sup>2</sup>, 涂小涛<sup>1</sup>, 汤清权<sup>2</sup>, 张勇军<sup>2</sup>

(1. 广东电科院能源技术有限责任公司, 广东 广州 510170; 2. 华南理工大学, 广东 广州 510641)

**摘要:** 为实现三端星型柔性直流配电系统定直流电压端、定功率端、直流变压器端有序启动, 首先设计了系统的启动控制策略, 同时设计了功率可控端功率按既定斜率下降的停运控制策略。其次, 提出了柔性直流配电系统的协调控制策略, 在直流变压器低压侧的不同元件投切时, 利用储能装置抑制功率波动, 以实现元件的平滑投退。最后, 通过 RTDS 仿真, 结果表明所提控制策略能够实现柔性直流配电系统的有序启动、协调运行和平滑停运。

**关键词:** 柔性直流配电系统; 启动控制; 协调控制; 停运控制; RTDS 仿真

### Start, stop and coordinated control of three-terminal flexible DC distribution system using star-type structure

CHEN Rui<sup>1</sup>, SONG Weiwei<sup>2</sup>, TU Xiaotao<sup>1</sup>, TANG Qingquan<sup>2</sup>, ZHANG Yongjun<sup>2</sup>

(1. Guangdong Diankeyuan Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou 510170, China;  
2. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** To realize the orderly start of the fixed DC voltage terminal, the fixed power terminal and DC Solid State Transformer (DCSST) terminal of three-terminal Flexible DC Distribution System (FDCDS) using star-type structure, the start control strategy of the DC distribution system is designed, and the stop control strategy that power of the power controllable terminal decreases according to the set slope is designed. A coordinated control strategy for the FDCDS is proposed. When the different components on the low-voltage side of the DCSST are switched, the energy storage device is used to suppress the power fluctuation to achieve smooth switching of the components. Finally, through RTDS simulation, the results show that the proposed control strategy can achieve the orderly start, coordinated running and smooth stop of FDCDS.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777077).

**Key words:** flexible DC distribution system; start control; coordination control; stop control; RTDS simulation

## 0 引言

随着新能源发电和电力电子技术的广泛应用, 电网中的非线性负荷越来越多<sup>[1-3]</sup>, 交流配电网将面临电压瞬时跌落、电压波动和三相不平衡现象加剧等一系列电能质量问题<sup>[4-6]</sup>。而直流配电网具有便于接入各种分布式电源、提高供电容量、线路损耗小、便于隔离系统故障等一系列优点<sup>[7-9]</sup>。因此, 直流配电系统将成为未来城市电网发展的重要支撑<sup>[8]</sup>。

目前直流配电网的拓扑结构有: 两端或多端结构、环网结构和辐射型结构<sup>[10-11]</sup>。星型拓扑结构属于较为特殊的直流配电结构, 是用一个节点作为中

心节点, 其他节点直接与中心节点相连的网络。它是两端“手拉手”拓扑结构的延伸, 类似于电话网络<sup>[12]</sup>。该拓扑结构具有以下优点: 1) 控制简单; 2) 故障诊断和隔离容易; 3) 实行的集中式控制, 方便控制和管理<sup>[13]</sup>。而另一方面, 由于中央节点采用集中式控制, 负担重, 形成“瓶颈”, 一旦发生故障, 全网受影响, 对此, 中央节点通常可采用双机热备份方案, 以提高基于星型拓扑结构直流配电网的可靠性。

2018年12月, 世界规模最大的多端交直流混合柔性直流配电系统(Flexible DC Distribution System, FDCDS)工程在广东珠海成功投运<sup>[14]</sup>。该工程采用±10 kV/±375 V 柔性中低压直流配用电系统结构, 从而实现功率转供的功能, 提高配电网的供电可靠

性。系统采用具有三个独立交流电源的“星型”网络拓扑结构。三端交流系统与中压直流配电母线之间均通过全控型电压源换流器相连。该工程构建了“互联网+”智慧能源新模式，形成了 FDCDS 技术标准规范，填补了国内外的空白。

然而，三端星型 FDCDS 的控制是关系到系统安全可靠运行的核心问题，当前的研究还比较薄弱。文献[15-16]提出了 HVDC 系统的启动方案，但未涉及直流配电网；文献[17]提出了一种三级固态变压器的启动方案，但未提到系统的启动；同样，文献[18]只提到了辅助电路启动和关闭多电平逆变器；文献[19]虽然提出了柔性直流电网的启动策略，但没有涉及停运策略；而文献[20]则提出了直流输电系统的停运控制策略；文献[21]只研究了基于两端

“手拉手”拓扑结构的直流配电网启动和协调控制，没有涉及三端直流配电系统。总体上看，当前针对三端星型 FDCDS 的启停和协调控制研究还不够深入。

本文以 FDCDS 的三端星型拓扑结构为例，系统性研究直流配电系统的启动、协调和停运控制方案，并基于 RTDS 实时仿真平台搭建系统仿真模型，对系统的启动、协调和停运控制过程进行研究，验证所提控制策略的有效性，可为基于星型拓扑结构的直流配电工程的应用提供借鉴。

### 1 FDCDS 的拓扑结构和基本运行控制方式

三端星型 FDCDS 的典型拓扑结构如图 1 所示。

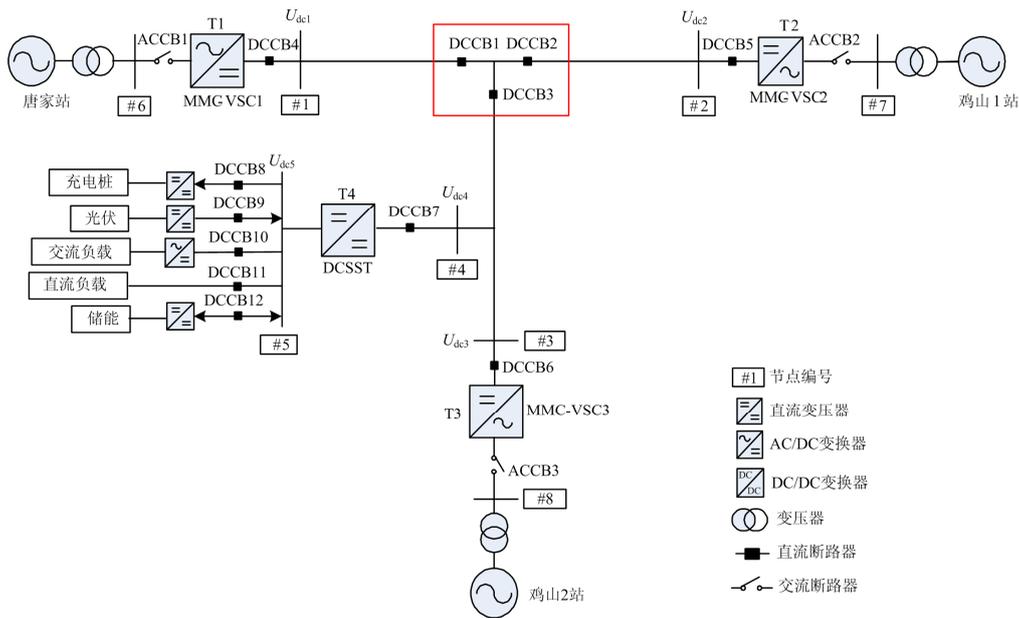


图 1 柔性直流配电系统结构

Fig. 1 Structure of FDCDS

由图 1 可见，该 FDCDS 有三端(T1、T2 和 T3)和交流系统相连接，包含±10 kV 高压直流母线(#1—#4)、±375 V 低压直流母线(#5)和 10 kV 交流母线(#6—#8)，以及电压源变换器(VSC1—VSC3)、直流变换器(DCSST)、直流断路器(DCCB1—DCCB7)和交流断路器(ACCB1—ACCB3)等设备<sup>[22]</sup>。

FDCDS 通过 3 个换流器与交流系统交换能量，既可由各个端的电压源换流器向直流系统供电，又可在其中两端或一端电压源换流器退出运行时，由剩余的电压源换流器维持正常运行。即使三端都退出运行，电压源换流器仍可作 STATCOM 方式运行。因此，可形成 6 种运行方式，如表 1 所示。其中，3

个换流器均有定直流电压和无功功率控制(Udc-Q)与定有功功率和无功功率控制(P-Q)两种控制方式，直流变压器则有定低压侧直流电压和定高压侧直流电压两种方式。

光伏并网换流器是功率指向直流系统的单向 Boost 换流器，控制模式为定直流电压控制；储能装置的并网换流器为双向 DC-DC 换流器，控制模式为定功率控制模式；充电装置的并网换流器为功率指向电池 Boost 斩波换流器，控制模式为定功率控制模式；交流负载并入直流电网的换流器为桥式逆变器结构，采用 V-F 控制模式；直流负载直接并入直流变压器低压侧。

表 1 柔性直流配电系统运行与控制方式

运行方式	MMC-VSC1	MMC-VSC2	MMC-VSC3	DCSST
三端联网	Udc-Q	P-Q	P-Q	定低压侧
	Udc-Q	P-Q	退出	定低压侧
双端手拉手	退出	Udc-Q	P-Q	定低压侧
	Udc-Q	退出	P-Q	定低压侧
双端隔离供电	Udc-Q	P-Q	Udc-Q	定低压侧
双端隔离运行	Udc-Q	P-Q	退出	定高压侧
	Udc-Q	退出	退出	定低压侧
单端供电	退出	Udc-Q	退出	定低压侧
	退出	退出	Udc-Q	定低压侧
STATCOM	Udc-Q	Udc-Q	Udc-Q	定高压侧

## 2 FDCDS 的启动、协调和停运控制

FDCDS 的控制系统分为系统级控制器和换流站级控制器。本文以三端联网运行模式为例, 说明 FDCDS 的启动、协调和停运控制。首先由系统级控制器设定 T1、T2、T3 和 T4 端 DCSST 的控制模式, 然后, 各端换流器按系统级设定的控制模式运行。

### 2.1 FDCDS 的启动控制

在 FDCDS 的启动过程中, 会产生过电压和过电流的现象, 应采取适当的启动措施来抑制这种现象的产生。直流配电系统有 2 个独立的控制量, 包括有功类控制量和无功类控制量, 每个换流器必须同时采用有功类控制器和无功类控制器各一种<sup>[23]</sup>。为了保证系统电压的稳定, FDCDS 有且仅有一端采用定直流电压和无功功率控制, 类似于交流系统的平衡节点, 且一般选择与有源网络连接的一端控制直流电压。为此, 本文设计的系统启动步骤如下。

1) 系统级控制器设定 T1 端是定 Udc-Q 控制, T2、T3 端为定 P-Q 控制, 直流变压器为定直流低压控制模式。

2) 闭合 T1、T2、T3 端充电回路开关, 由交流系统向直流网络进行不可控充电; 当不可控充电完成后, 定 Udc-Q 控制的 T1 端先解锁启动, 进行可控充电。这一过程为充电过程。

首先由于 MMC 模块中控制单元的工作电源取自功率模块直流电容器供电的高位取能电源装置, 在功率模块直流电容器储能达到高位取能电源额定工作电压前, 控制单元处于失能状态, 也即不可控充电。

为防止柔性直流系统在启动过程产生过电压和过电流, 一般在不可控充电阶段投入限流电阻 $R_c$ 使其串联在启动回路中, 同时使换流器触发脉冲保持闭锁, 直到不可控充电结束后再将限流电阻旁路。

在不可控充电时, 每一相的上桥臂或下桥臂中

只有一个桥臂处于充电模式, 另一个桥臂位于功率模块下侧的二极管处于导通状态, 因此桥臂电容充电的最大电压近似为交流侧电压的峰值 $\sqrt{2}U_s$ , 即直流侧电压能够达到的最大值为 $\sqrt{2}U_s$ , 该幅值小于直流电压的额定值 $U_{dcN}$ <sup>[24]</sup>, 这里 $U_s$ 为换流器输入交流电压的有效值。

在不可控充电阶段, 功率模块电容电压与额定电压的关系为

$$\tau = \frac{U_c}{U_{cN}} = \frac{u_s / N}{U_{dcN} / (N - M)} = \frac{u_s}{U_{dcN}} \times \frac{N - M}{N} \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为功率模块电容充电率;  $U_c$  及  $U_{cN}$  分别为功率模块的运行电压和额定运行电压;  $N$  和  $M$  分别为桥臂的功率模块数和冗余功率模块数;  $u_s$  为换流器输入交流电压。

由式(1)可以看出, 在不可控充电阶段, 功率模块电容电压并不能达到额定值, T1 端一般最多仅能达到 0.74 p.u.(其他无源端一般最大能达到 0.37 p.u.)<sup>[25]</sup>, 因此不可控充电阶段结束阈值 $U_{th}$ (即换流器桥臂解锁电压阈值)一般设定为 0.3~0.35 $U_{dcN}$ (其他无源端则设定为 0.1~0.15 $U_{dcN}$ ), 当 $U_{dc} \geq 2U_{th}$ 时则不可控充电阶段结束。

当不可控充电完成后, 旁路限流电阻 $R_c$ , T1 端先解锁启动, 通过控制系统中外环控制器的限幅环节来达到限流目的, 即可控充电, 直到直流电压抬升到额定电压为止。

上述过程如图 2 所示。

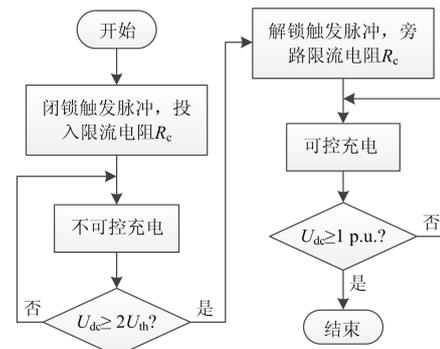


图 2 T1 端充电过程流程图

Fig. 2 Flowchart of charging process at terminal T1

3) 当 T1 端的直流电压达到额定值, 同时其他端不可控充电完成后, 解锁定 P-Q 控制的 T2、T3 端。这是因为先启动的 T1 端必为有源侧, 而其他端有可能为无源端, 这时其他无源端只能通过有源侧先启动后经直流线路向其 MMC 子模块充电, 也即 T2、T3 端若为无源端, 则其整个充电过程是从 T1 端直流电压达到额定值并向其他端充电开始; 同

时合上三端主开关,将充电回路开关旁路,抬升 T2、T3 端有功功率。

4) 启动直流变压器,抬升直流变压器低压侧直流电压,直流变压器按照定直流低压运行模式运行。

5) 合上主开关,并接入储能、光伏,解锁各自的并网换流器,各端按既定控制模式运行。

6) 接入充电桩、交流负载和直流负载开关,解锁各自的并网换流器,各端按既定控制模式运行。启动流程如图 3 所示。

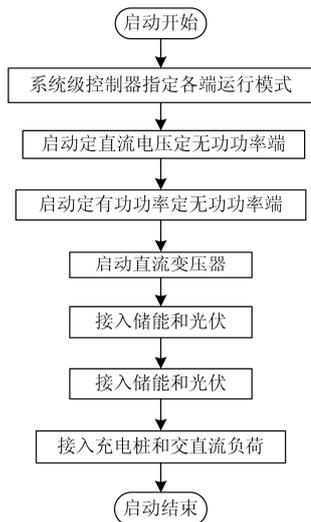


图 3 启动控制的流程图

Fig. 3 Flowchart of the start control

### 2.2 FDCDS 的协调控制

运行协调控制主要是考虑交直流混合配网中分布式电源出力的不确定性和负荷的波动性,研究交直流混合配网中不同类型换流器的协调控制策略,实现配网内能量的双向平滑流动,提高系统应对外界功率扰动的自适应性。

本文设计的协调控制主要是在 T4 端实现。T4 端带着 1 MW 储能、0.7 MW 光伏发电系统、1 MW 充电桩、0.5 MW 直流负荷和 0.5 MW 交流负荷。直流变压器下的总电源为 1.7 MW,总负荷为 2 MW,负荷容量和电源容量大致相当,可以考虑充分利用储能装置的“削峰填谷”作用,通过快速跟踪直流变压器低压侧直流电网的功率变化,有效抑制交流负载、直流负载、充电桩投切和光照强度变化引起的功率波动,实现各种元素的平滑接入。

储能电池通过双向 DC-DC 变换器并入 FDCDS。储能的控制策略如图 4 所示。该控制策略将储能和光伏作为一个整体电源,该电源输出的总功率(光伏与储能输出的总功率)根据运行需要设置为一个定值  $P_{ESref}$ 。 $P_{ESref}$  与光伏功率  $P_{PV}$  之差为储能的参

考值  $P_{ESref}$ 。此参考值与实际储能值  $P_{ES}$  比较后得到的误差信号,送入 PI 控制器,再与三角载波比较产生 PWM 调制信号,驱动储能的双向 DC-DC 变换器,实现储能输出的功率跟踪光伏输出功率的波动,从而使得储能和光伏形成一个稳定输出的电源。

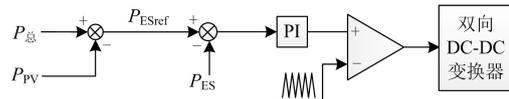


图 4 储能控制

Fig. 4 Control of energy storage

### 2.3 FDCDS 的停运控制

如果仅从有功功率的角度出发,并入 FDCDS 的各端换流器可以分为功率可控端和功率不可控端。其中 T2 端、T3 端、储能、交流负荷(通过调整交流电压降低功率)和充电桩都是功率可控端,而 T1 端、直流变压器、直流负荷和光伏是功率不可控端。直流系统的停运由运行人员在控制主站发出,控制系统自动完成系统正常停运需要执行的顺序控制操作。停运控制需要将功率可控端的功率降低为 0,然后再闭锁对应的换流器。

本文设计的停运控制是在各端功率可控端换流器接到系统级控制器发出的停运指令时,调整可控端换流器功率按斜率降低。当各功率可控端的功率均为 0 时,闭锁所有换流器端(包括功率可控端和不可控端)。而后,各端的交流/直流断路器断开,系统停运,如图 5 所示。

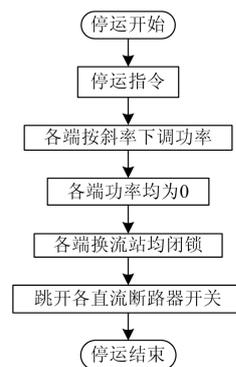


图 5 停运控制的流程图

Fig. 5 Flowchart of the stop control

## 3 仿真分析

针对图 1 所示的三端星型 FDCDS,在 RTDS 仿真平台中搭建了仿真模型,如图 6 所示。其中 T1、T2 和 T3 端接入 10 kV 交流配电网,T4 端并入直流变压器,直流变压器低压侧接入光伏、储能、充电桩、交流负载、直流负载。

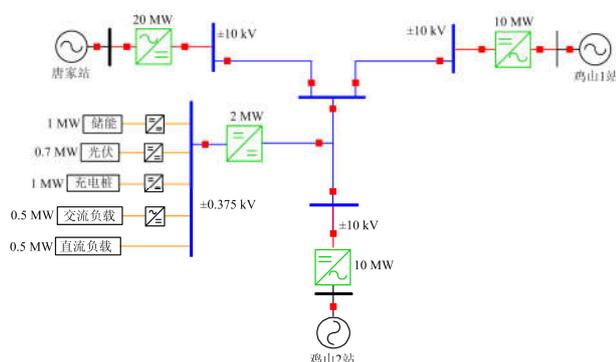


图 6 柔性直流配电系统 RTDS 模型图

Fig. 6 Model of RTDS simulation for FDCDS

以三端联网运行模式为例, 验证所提启动和停运控制策略的有效性。该运行模式下, T1 端的换流器采用定  $U_{dc}$ -Q 控制模式; T2 和 T3 端换流器采用定 P-Q 控制模式; T4 端 DCSST 采用定低压侧直流电压控制模式。

### 3.1 启动控制仿真

FDCDS 的启动控制过程如图 7 所示。首先合上 T1—T3 端辅助开关, 交流系统向三个换流器不可控整流充电, 直流电网电压逐渐抬升, 在 13 s 时刻抬升到 0.7 p.u.。T1 端控制器阀控解锁, 带着 T2、T3 端抬升额定直流电压后, 合上 T1 端主开关, 解锁 T2 端和 T3 端换流器, 而后合上 T2、T3 端主开关, 系统进入空载运行阶段。然后 T2 端开始按既定斜率抬升功率到 0.4 p.u., T3 端随后抬升功率到 0.2 p.u., T1—T3 端均能稳定运行。

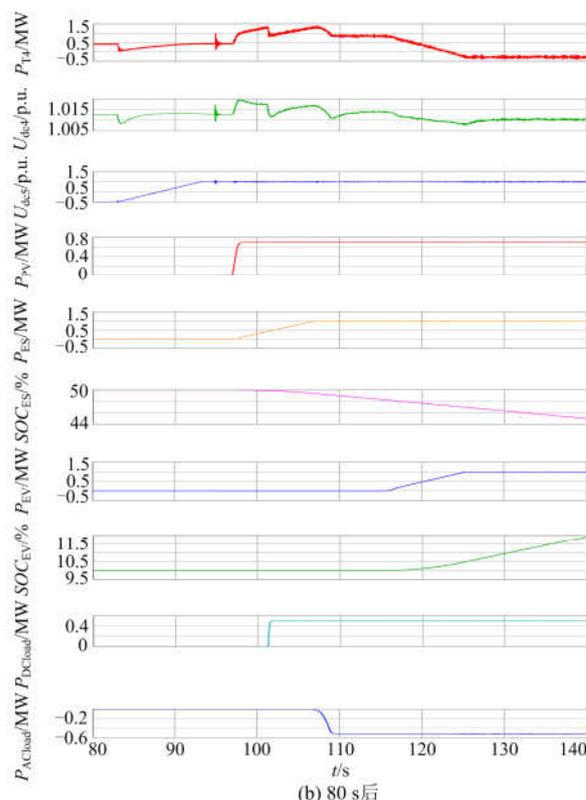
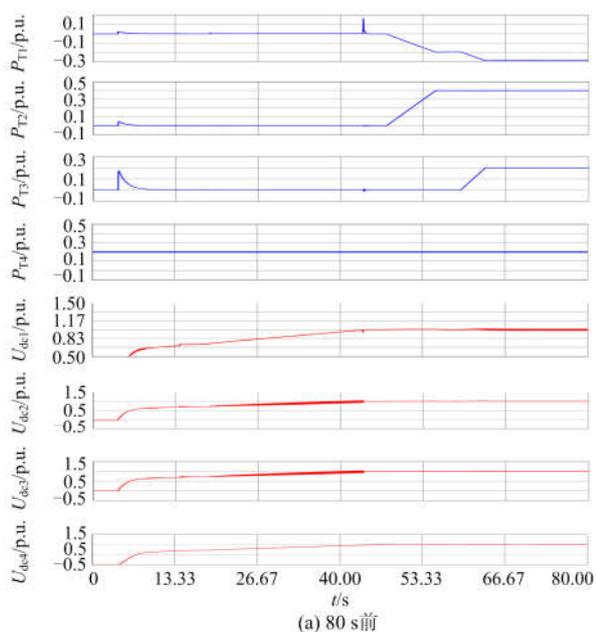


图 7 FDCDS 启动控制仿真图

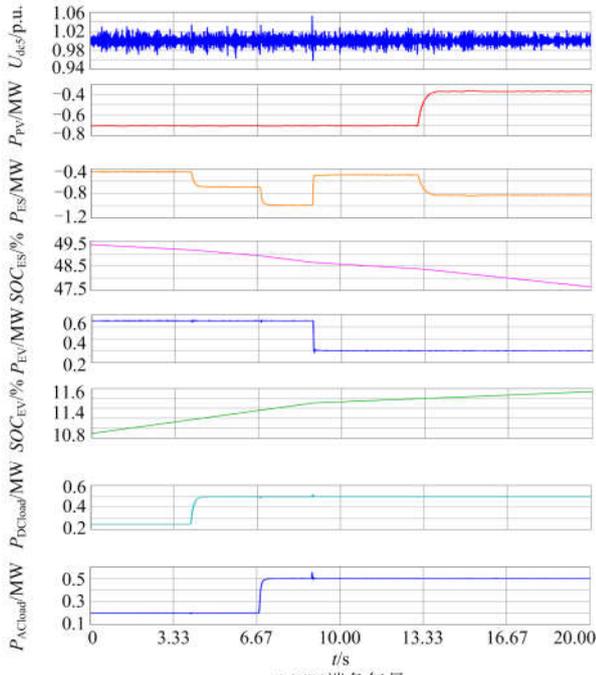
Fig. 7 Simulation results of the start control of FDCDS

80 s 后, T1 建立直流电压, T4 端闭合高压侧开关, 通过充电电阻对直流变压器高压侧电容进行充电, 建立直流电压、直流变压器控制器解锁高压/低压侧换流, 低压按斜率进行充电至 1 p.u.。充电完成后, 合上低压侧开关, 直流低压侧母线为  $\pm 375$  V, 然后储能控制器和光伏控制器先后解锁并网换流器, 储能按斜率将注入直流低压母线的功率提升到 1 MW, 光伏阵列注入直流电网的功率达到 0.7 MW。直流负荷通过直流断路器并入直流变压器低压母线, 功率为 0.5 MW; 交流负载并网控制器控制三相桥式逆变器交流侧电压按斜率提升有效值, 功率达到 0.5 MW; 充电桩控制器解锁其并网逆变器, 按斜率提升充电功率达到 1 MW。至此, 整个直流配电系统完成了启动和功率提升过程, 从仿真结果来看, 系统进入稳定运行状态。

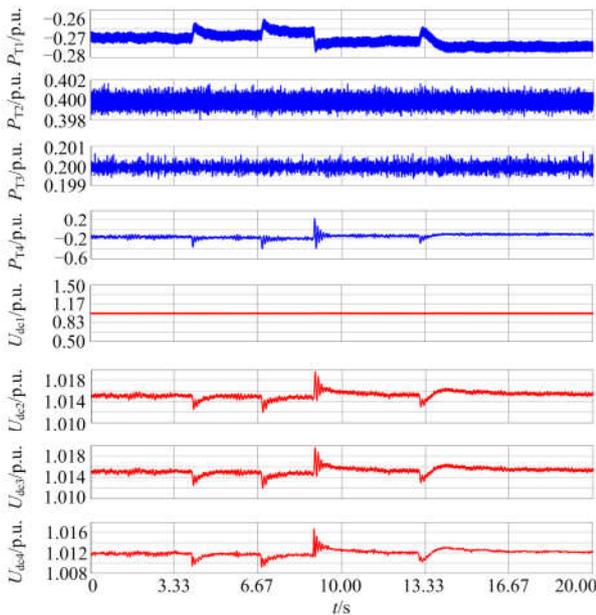
### 3.2 协调控制仿真

FDCDS 在直流变压器低压侧接入元件时采用协调控制。直流变压器直流电压、光伏功率、储能功率、储能荷电状态(SOC<sub>ES</sub>)、充电桩功率、充电电池荷电状态(SOC<sub>EV</sub>)、直流负载功率和交流负载功率

变化趋势如图 8(a)所示。由图可见，储能装置始终跟踪直流变压器低压侧负载，保证直流低压侧向 ±10 kV 直流网络注入或吸收的功率为 0。由于储能的“削峰填谷”作用，T4 端直流变压器变高侧直流电压和直流功率始终保持稳定，交直流负载、充电电池和光伏光照强度变化引起的功率与电压波动得到了有效的抑制。



(a) T4端各气量



(b) 各端功率和电压

图 8 协调控制仿真结果

Fig. 8 Simulation results of the coordination control

此外，交直流负载、充电电池和光伏阵列的变化趋势与分散控制的变化趋势一致。直流负载初始功率为 0.25 MW。在 4 s 时刻增加投入了直流负载，功率跃升到 0.5 MW。同时，储能电池输出的功率跟踪直流负载的阶跃变化，也相应增大 0.25 MW，有效抑制了直流负载阶跃引起的直流变压器变高侧功率和电压的波动，直流电压和功率保持恒定，直流电压维持在 1.012 p.u.，变高侧功率维持在 -0.3 MW。

在 7 s 时刻，交流负载功率从 0.25 MW 跃升到 0.5 MW，储能电池输出的功率也相应增大 0.25 MW，有效抑制了交流负载阶跃引起的直流变压器变高侧功率和电压的波动，直流电压和功率依然保持恒定。在 9 s 时刻，充电桩退出了部分充电电池组，充电功率从 0.7 MW 降低到 0.2 MW，储能电池输出功率也相应减小 0.5 MW，此时直流电压和功率依然保持恒定。仿真到 15 s 时刻，光照强度发生变化，光伏阵列输出功率从 0.7 MW 下降到 0.4 MW，储能电池输出功率即相应增大 0.3 MW，直流电压依然维持在 1.012 p.u.，变高侧功率依然维持在 -0.3 MW。

从整个仿真过程来看，由于储能介入了直流变压器低压侧的功率调节，使得高压侧直流电压和功率在各种扰动情况下依然维持稳定，有效发挥了储能装置的“削峰填谷”作用，整个 FDCDS 负载频繁投切所引起的直流网络电压快速波动得到有效抑制，实现了直流负载的平滑接入。

图 8(b)是在上述负荷剧烈变化下 T1—T4 各端换流站的直流电压和直流功率变化趋势图。由图可见，T2 端、T3 端的直流母线电压和 T4 端直流电压的变压趋势是一致的，而 T1 端电压维持不变，这表明在储能装置的协调控制下，3.2 节所述的四种工况引起的 T1 端直流电压被有效抑制，储能装置的协同控制效果明显。

### 3.3 直流配电系统的停运控制

FDCDS 的停运过程如图 9 所示。系统级控制器收到停运指令后，调整可控端换流器(T2、T3 端和储能、交流负荷等)的交流电压降低功率，充电桩的功率按斜率降低，闭锁所有换流器端(包括 T2、T3 端，储能、交流负荷、充电桩、T1 端、光伏)，各端的交流/直流断路器断开，系统停运。由图 9 可见，停运控制过程稳定合理。

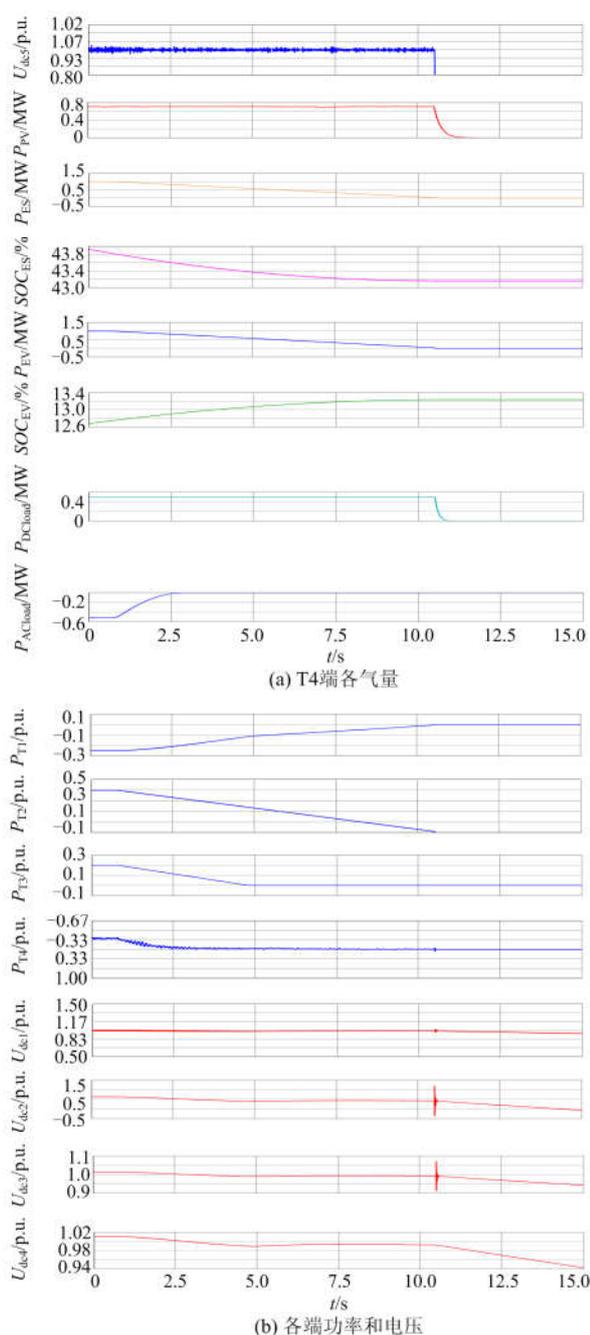


图9 停运控制仿真结果

Fig. 9 Simulation results of stop control

## 4 结论

本文系统性研究并提出了 FDCDS 的有序启动控制、协调控制以及停运控制策略, 并开展 RTDS 仿真验证。结果表明: 通过 FDCDS 三个换流器协同配合, 完成了从不可控整流充电到直流电压按斜率抬升再到功率按斜率传送的全过程启动控制; 利用储能装置的“削峰填谷”作用, 快速跟踪直流变压器低压侧直流电网的功率变化, 能有效抑制交流

负载、直流负载、充电桩投切和光照强度变化引起的功率波动, 实现多种负荷元素的平滑接入和协调控制; 设计的停运方案, 当接收到停运指令, FDCDS 功率可控端的功率按斜率下降, 闭锁换流器, 切除并网开关, 实现了 FDCDS 平稳停运。

## 参考文献

- [1] 张勇军. 高压直流输电原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [2] 周嘉阳, 李凤婷, 刘渊, 等. 基于直流电抗电压的柔性直流配电网故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 95-101.  
ZHOU Jiayang, LI Fengting, LIU Yuan, et al. Fault location method for flexible DC distribution network based on DC reactance voltage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 95-101.
- [3] MAHDI B, MEHRDAD A, GEVORK B G et al. Short-term interaction between electric vehicles and microgrid in decentralized vehicle-to-grid control methods[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 42-52. DOI: 10.1186/s41601-019-0118-4.
- [4] 郑欢, 江道灼, 杜翼. 交流配电网与直流配电网的经济性比较[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3368-3374.  
ZHENG Huan, JIANG Daozhuo, DU Yi. Economic comparison of AC and DC distribution system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3368-3374.
- [5] 曾嘉思, 徐习东, 赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582-2589.  
ZENG Jiasi, XU Xidong, ZHAO Yuming. Reliability comparison of AC and DC distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2582-2589.
- [6] QIAO L, LI X, HUANG D, et al. Coordinated control for medium voltage DC distribution centers with flexibly interlinked multiple microgrids[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(3): 599-611.
- [7] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [8] 张勇军, 刘子文, 宋伟伟, 等. 直流配电系统的组网技术及其应用[J/OL]. 电力系统自动化:1-11[2019-09-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20190905.0948.002.html>.
- [9] ZHANG L, CHEN Y, SHEN C, et al. Coordinated voltage regulation of hybrid AC/DC medium voltage distribution networks[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3): 463-472.

- [10] JI Y, YUAN Z, ZHAO J, et al. Overall control scheme for VSC-based medium-voltage DC power distribution networks[J]. IET Generation, Transmission, and Distribution, 2018, 12(6): 1438-1445.
- [11] 杜翼, 江道灼, 尹瑞, 等. 直流配电网拓扑结构及控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 139-145.  
DU Yi, JIANG Daozhuo, YIN Rui, et al. Topological Structure and control strategy of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 139-145.
- [12] 季一润, 袁志昌, 孙谦浩, 等. 柔性直流配电网典型运行方式及切换方法[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 8-15.  
JI Yirun, YUAN Zhichang, SUN Qianhao, et al. Typical operation mode and switching method of VSC-DC distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 8-15.
- [13] ZHANG W, HUANG S, MEI S, et al. Exponential synchronization of the Kuramoto model with star topology[C] // The 35th Chinese Control Conference, July 2016, Chengdu, China: 10047-10050.
- [14] 智慧湾区! 珠海国家“互联网+”智慧能源示范项目通过验收[J]. 南方能源建设, 2019, 6(1): 119.  
Smart Bay Area! Zhuhai National “Internet +” Smart Energy Demonstration Project passed the acceptance test[J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(1): 119.
- [15] LI T, ZHAO C, XU J. Start-up scheme for HVDC system based on modular multilevel converter[C] // 2nd IET Renewable Power Generation Conference (RPG 2013), September 2013, Beijing, China: 1-4.
- [16] WANG P, LI Z, ZHANG X, et al. Start-up sequences of an offshore integrated MMC MTDC system[C] // 11th IET International Conference AC and DC Power Transmission, February 2015, Birmingham, UK: 1-7.
- [17] LIU X, LI H, WANG Z. A start-up scheme for a three-stage solid-state transformer with minimized transformer current response[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 27(12): 4832-4836.
- [18] ASHAIBI A A, FINNEY S J, WILLIAMS B W, et al. Extend the use of auxiliary circuit to start up, shut down, and balance of the modified diode clamped multilevel inverter[C] // 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, November 2007, Bangkok, Thailand: 1049-1053.
- [19] 姬煜轲, 赵成勇, 李承昱, 等. 含新能源接入的柔性直流电网启动策略及仿真[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 98-104.  
JI Yuke, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Start-up strategy and simulation of flexible DC grid with renewable energy source[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 98-104.
- [20] 张哲任, 徐政, 许烽, 等. 模块化多电平换流器型高压直流输电系统停运控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2670-2680.  
ZHANG Zheren, XU Zheng, XU Feng, et al. Shut-down control scheme for modular multilevel converter based HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2670-2680.
- [21] 戴志辉, 葛红波, 陈曦, 等. “手拉手”多端柔性直流配电系统启动与协调控制策略研究[J]. 华北电力大学学报, 2017, 44(5): 1-9.  
DAI Zhihui, GE Hongbo, CHEN Xi, et al. Start-up and coordination control strategy in “hand-in-hand” multi-terminal flexible DC distribution system[J]. Journal of North China Electric Power University, 2017, 44(5): 1-9.
- [22] 付东, 陈冰, 张勇军. 柔性直流电网的连接方式与建模综述[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 1-8.  
FU Dong, CHEN Bing, ZHANG Yongjun. Review on connection mode and modeling of flexible DC power distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 1-8.
- [23] 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 Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [24] 孔明, 邱宇峰, 贺之渊, 等. 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, QIU Yufeng, HE Zhiyuan, et al. Pre-charging control strategies of modular multilevel converter for VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 67-73.
- [25] 邓丽君, 郭琦, 林雪华, 等. 基于 RTDS 闭环实时仿真的电网 VSC-HVDC 黑启动控制策略的改进[J]. 南方电网技术, 2018, 12(9): 7-13.  
DENG Lijun, GUO Qi, LIN Xuehua, et al. Improvement of VSC-HVDC black start strategy in the power grid based on RTDS closed loop real time simulation[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(9): 7-13.

收稿日期: 2019-03-12; 修回日期: 2019-11-02

作者简介:

陈锐(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为柔性直流输电、分布式能源与微网技术研究与工程应用;

宋伟伟(1984—), 女, 博士生, 研究方向为柔性直流输电技术, 大功率电力电子技术; E-mail: 187320243@qq.com

涂小涛(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为配电网新技术、分布式能源与微网技术研究与工程应用。

(编辑 许威)