

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.05.015

适用于直流配电网的组合电容型直流负荷开关

陈铮¹, 陈武¹, 马建军²

(1. 东南大学先进电能变换技术与装备研究所, 江苏 南京 210096;

2. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要:直流负荷开关是构建直流配电网的关键设备。针对现有直流负荷开关附加设备多、体积大、控制复杂等缺点,文中提出组合电容型直流负荷开关拓扑,并分析所提拓扑工作原理、控制策略和参数设计。该负荷开关利用预充电电容构成源侧部分和荷侧部分。且多条直流母线出线上的负荷开关共用源侧部分,降低了设备体积和成本。切负荷过程中,通过源、荷侧电容的配合,给机械开关提供一个低电压、零电流的关断条件。最后在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型,对所提拓扑的可行性与有效性进行验证。结果表明,文中直流负荷开关能够可靠无弧关断负荷电流,保障直流配电网的安全运行,且所需设备成本低,有助于提高直流配电网的经济性。

关键词:直流负荷开关;直流配电网;预充电电容;组合电容;机械开关;无弧关断

中图分类号:TM564

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)05-0124-07

0 引言

随着光伏等分布式新能源的快速发展以及数据中心等直流负荷日益增多,配电网中源、荷的直流特性日趋明显。相比于交流配电网,直流配电网能有效减少变流环节,提高分布式新能源接入能力和能源利用效率,近年来受到国内外学者的广泛关注^[1-4]。然而,直流配电网的发展离不开快速、可靠、低成本的开关设备,其关乎电力系统的安全可靠运行。

关断负荷电流时,直流与交流系统的主要差异为直流电流不存在过零点,因此关断直流电流的关键在于通过附加电路创造人工过零点熄灭电弧^[5-6]。文献[7-9]采用直流真空负荷开关串联机械开关作为核心开关器件,关断负荷电流时,通过换相电路注入反向脉冲电流在真空开关中形成过零点熄灭电弧。但是该方案需要额外的换相电容充电电路,增加了负荷开关的成本与体积且控制复杂。文献[10]基于起弧抑制原理设计一种无弧直流负荷开关,通过限制机械开关动、静触头两端的电压、电场强度来避免燃弧。文献[11]提出一种基于晶闸管的电压钳位型直流负荷开关,通过可变钳位电压迫使线路电流下降过零,实现故障快速清除,该直流负荷开关不使用全控型器件,能有效控制成本。但该电压钳位型负荷开关支路电压等级过高,致使线路晶闸管的耐压等级极高,需要大量晶闸管串联满足其应力需求。基于混合直流断路

器的关断机理,文献[12]提出电容换流型直流负荷开关,但该拓扑在负荷电流转移过程中,电容充电导致机械开关支路两端的电压上升较快,不利于无弧关断。文献[13-14]提出组合式直流负荷开关方案,该方案由于存在共享部分,经济性较好,具有广阔的应用前景。

基于上述背景,现有直流负荷开关方案存在控制复杂、运行损耗大、成本高等问题。文中提出一种新型的组合电容式直流负荷开关,该负荷开关包含源侧和荷侧部分,通过源、荷两侧电容的配合为机械开关提供低电压、零电流的关断条件,同时多条直流出线通过共用源侧部分降低直流负荷开关的成本和体积。此外,所提直流负荷开关相对现有直流负荷开关方案,需求量多的开关器件均为成本较低的晶闸管和二极管器件,因而造价较低。文中对所提直流负荷开关的拓扑结构、工作原理、控制策略以及参数设计进行分析,并在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型对所提直流负荷开关方案进行验证。

1 拓扑和工作原理

1.1 拓扑

文中所提组合电容型直流负荷开关拓扑如图1所示,该负荷开关包括源侧部分(A部分)和荷侧部分(B部分,对应到每条线路上的 B_1, B_2, \dots, B_N)。图中同时给出了配置方法,组合电容型直流负荷开关的源侧部分安装在直流母线一侧,荷侧部分安装在该直流母线对应的每一条直流出线上。每条直流线路上负荷开关的成功动作需要源、荷侧部分的

收稿日期:2022-04-07;修回日期:2022-07-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2166216)

可靠配合。

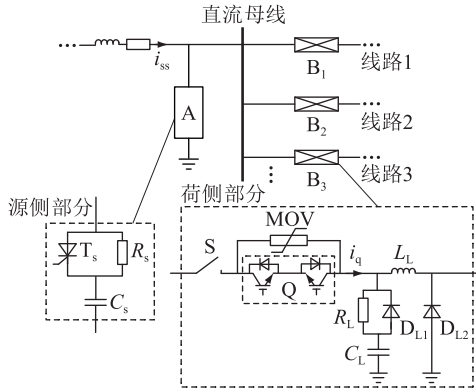


图1 组合电容型直流负荷开关拓扑

Fig.1 Topology of assembly DC load switch based on pre-charged capacitors

图1中负荷开关每个部分的具体结构如下。源侧部分包括起主导作用的源侧电容器组 C_s ，源侧充电电阻 R_s ，用于换流的晶闸管阀组 T_s 。荷侧部分包括绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 串联构成的开关管组 Q ，金属氧化物避雷器 (metal oxide varistor, MOV)，快速机械开关 S ，起主导作用的荷侧电容器组 C_L ，荷侧充电电阻 R_L ，放电二极管阀组 D_{L1} ，保护用二极管阀组 D_{L2} ，荷侧线路等效电感 L_L 。 i_{ss} 为源侧线路电流； i_q 为载流支路电流。在切负荷过程中 C_s 可以支撑直流母线电压，同时通过两侧电容的配合可以实现 S 无弧关断。此外， Q 和 S 构成负荷开关的载流支路，为电网正常运行时的功率传输提供通道。电网正常运行时， C_s 和 C_L 进行预充电，以备切负荷时可以给 S 提供低电压的关断条件。

1.2 工作原理

基于图1拓扑，分析负荷开关工作原理，以关断线路1上的直流负荷电流为例进行分析。直流配电网正常运行时， T_s 处于关断状态， D_{L1} 和 D_{L2} 因承受反压而截止关断，系统通过 S 所在的载流支路向直流负荷传送功率，且由于 S 所在支路损耗较小，所以传输效率高。同时，系统通过 R_s 和 R_L 分别给 C_s 和 C_L 充电。

所提直流负荷开关控制时序如图2所示。在 t_1 时刻，系统对线路1切负荷，此时给 T_s 触发信号，为载流支路切断之后的源侧部分提供续流通道。在 t_2 时刻，给 Q 关断信号，切断 i_q ，此时 C_s 通过 T_s 进行充电，与源侧等效电感、电阻形成 RLC 二阶电路， i_{ss} 开始下降。 C_L 则经过 L_L 向负荷放电，形成二阶零输入 RLC 电路。值得注意的是，由于负荷电阻的不确定性，负荷侧 RLC 二阶电路可能处于过阻尼、欠阻尼

和临界阻尼3种状态^[10]。若负荷侧处于过阻尼和临界阻尼状态， C_L 上的电压和负荷电流在衰减到零后，关断过程结束；若处于欠阻尼状态，则负荷侧会出现振荡现象， D_{L2} 在负荷电压反向时导通，保护负荷免受反向电压与电流。 t_3 时刻，在 i_q 转移结束之后，开始关断 S ，源、荷两侧实现电气隔离。考虑现有开关器件技术条件的限制，图2中各时序之间的延迟设定为： $\Delta t_1 = t_2 - t_1$ ，设置为 $20 \mu\text{s}$ ； $\Delta t_2 = t_3 - t_2$ ，设置为 $20 \mu\text{s}$ ； $\Delta t_3 = t_4 - t_3$ ，取 2ms ^[15]。

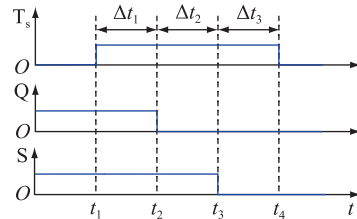


图2 所提直流负荷开关控制时序

Fig.2 Control sequence of proposed DC load switch

2 电路原理及应力分析

2.1 电路原理

t_1 时刻之前直流负荷开关载流支路闭合，承载负荷电流，同时电网向 C_s 和 C_L 充电，具体导通回路如图3(a)所示。以线路1为例，负荷开关充电时的等效电路如图4所示。图中， R_{ss} 、 L_{ss} 分别为源侧等效电阻和电感； i_{cs} 、 i_{cl} 分别为源侧和荷侧电容电流； i_{ls} 为荷侧线路电流。通过节点电压法对电路分析可得：

$$\begin{cases} (G_{ss} + G_{sp} + G_{ls} + G_{lp})U_{n2} - G_{ss}U_{n1} = 0 \\ U_{n1} = U_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

式中： U_{dc} 为直流电压； U_{n1} 、 U_{n2} 分别为节点①和②的电压； G_{ss} 、 G_{sp} 、 G_{ls} 、 G_{lp} 分别为源侧串联支路、源侧并联支路、荷侧串联支路和荷侧并联支路电导。

$$\begin{cases} G_{ss} = \frac{1}{R_{ss} + j\omega L_{ss}} \\ G_{sp} = \frac{1}{R_s - j\frac{1}{\omega C_s}} \\ G_{ls} = \frac{1}{R_{L1} + j\omega L_L} \\ G_{lp} = \frac{1}{R_L - j\frac{1}{\omega C_L}} \end{cases} \quad (2)$$

式中： R_{L1} 为荷侧电路等效电阻。

此外，在考虑 N 条直流出线之后，将式(1)修正为：

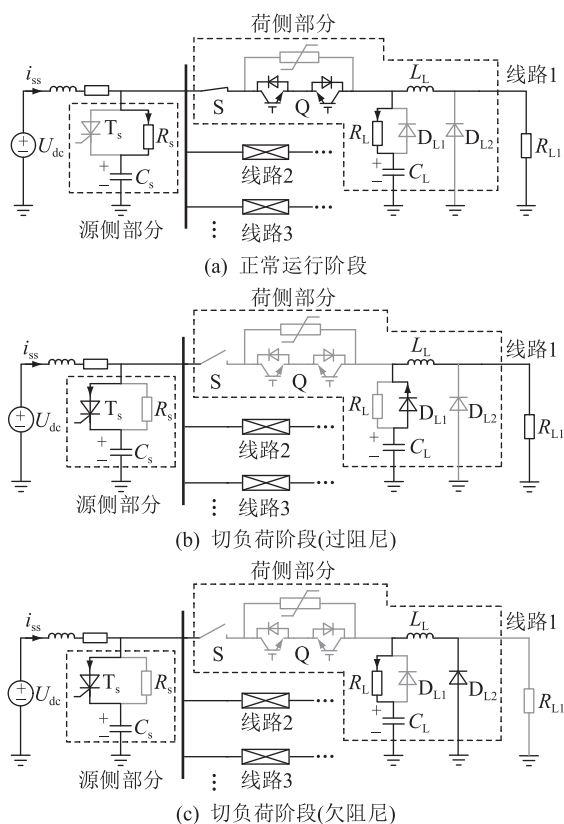


图3 直流负荷开关各阶段工作模式

Fig.3 Operation mode of each stage of DC load switch

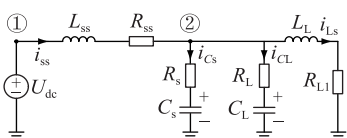


图4 线路1 负荷开关充电等效电路

Fig.4 Load switch charging equivalent circuit of line 1

$$U_{n2} = \left| \frac{G_{ss}}{G_{ss} + G_{sp} + N(G_{Lp} + G_{Lsj})} \right| U_{dc} \quad (3)$$

式中: $G_{Lsj} (j=1, 2, \dots, N)$ 为第 j 条直流出线上的荷侧串联支路电导。

由于 G_{ss} 远大于其他支路电导, 通过式(3)可以看出节点②处的电压即直流母线电压与直流系统额定电压保持相近。但当直流出线数 N 以及 G_{Lsj} 变化时, 也会影响直流母线电压。为了保证预充电电容正常运行时对直流母线电压的支撑作用, 应严格限制每条线路的负荷容量。

在关断 Q 后, 源、荷之间实现初步隔离, 源侧处于对电容 C_s 充电的状态, 其等效电路如图 5 所示。电路的初始状态和参数为:

$$\begin{cases} u_{Cs}(t_2) = U_c \\ i_{Lss}(t_2) = I_{dc} \end{cases} \quad (4)$$

式中: u_{Cs} 为 C_s 两端的电压; i_{Lss} 为 L_{ss} 中的电流; U_c 为

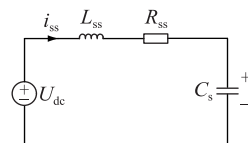


图5 源侧电容充电等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of source side capacitor charging t_2 时刻源侧电容电压; I_{dc} 为负荷电流。

由图 5 求得:

$$u_{Cs}(t) = U_{dc} + \frac{1}{\beta_1 - \beta_2} [A_1 e^{\beta_1(t-t_2)} - A_2 e^{\beta_2(t-t_2)}] \quad (5)$$

式中:

$$\begin{cases} \beta_1 = -\frac{R_{ss}}{2L_{ss}} + \sqrt{\left(\frac{R_{ss}}{2L_{ss}}\right)^2 - \frac{1}{L_{ss}C_s}} \\ \beta_2 = -\frac{R_{ss}}{2L_{ss}} - \sqrt{\left(\frac{R_{ss}}{2L_{ss}}\right)^2 - \frac{1}{L_{ss}C_s}} \\ A_1 = \frac{I_{dc}}{C_s} - (U_c - U_{dc})\beta_2 \\ A_2 = \frac{I_{dc}}{C_s} - (U_c - U_{dc})\beta_1 \end{cases} \quad (6)$$

当负荷电阻较大时, 负荷侧 RLC 电路处于过阻尼状态, 电容的放电路径如图 3(b) 所示, 该电路为零输入二阶 RLC 电路, 回路方程为:

$$L_L C_L \frac{d^2 u_{CL}}{dt^2} + R_{L1} C_L \frac{du_{CL}}{dt} + u_{CL} = 0 \quad (7)$$

式中: u_{CL} 为 C_L 两端的电压。对式(7)求解可得:

$$u_{CL}(t) = \frac{1}{\beta_3 - \beta_4} [A_3 e^{\beta_3(t-t_2)} - A_4 e^{\beta_4(t-t_2)}] \quad (8)$$

式中:

$$\begin{cases} \beta_3 = -\frac{R_{L1}}{2L_L} + \sqrt{\left(\frac{R_{L1}}{2L_L}\right)^2 - \frac{1}{L_L C_L}} \\ \beta_4 = -\frac{R_{L1}}{2L_L} - \sqrt{\left(\frac{R_{L1}}{2L_L}\right)^2 - \frac{1}{L_L C_L}} \\ A_3 = -\frac{I_{dc}}{NC_L} - U_c \beta_4 \\ A_4 = -\frac{I_{dc}}{NC_L} - U_c \beta_3 \end{cases} \quad (9)$$

当负荷电阻较小时, 负荷侧 RLC 电路处于欠阻尼状态, 负荷侧出现振荡, 在负载电压反向后 D_{L2} 导通, 与 L_L, R_L, C_L 构成新的 RLC 过阻尼系统, 如图 3(c) 所示, 能量衰减过程与式(8)相同, 此处不再赘述。

由于负荷具有不确定性, 荷侧 RLC 电路的工作

状态不唯一。但考虑到每条配电线路的实际载荷能力,仍可确定其相对状态。记 $R_{L,c}, R_{L,N}$ 分别为每条线路的临界和额定载荷电阻,则有:

$$R_{L,c} = 2\sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \quad (10)$$

$$R_{L,N} = \frac{U_N^2}{P_N} \quad (11)$$

式中: U_N, P_N 分别为负荷额定电压、负荷额定有功功率。

当 $R_{L,N} > R_{L,c}$ 时,切负荷过程中荷侧电路工作在过阻尼状态;当 $R_{L,N} = R_{L,c}$ 时,荷侧电路工作在临界阻尼状态;当 $R_{L,N} < R_{L,c}$ 时,荷侧电路工作在欠阻尼状态。一般而言, $R_{L,c}$ 均小于 $R_{L,N}$,即电路工作在过阻尼状态。

2.2 电流应力

当直流负荷开关挂网运行时,载流支路流过负荷电流,该负荷电流可能为额定负荷电流 I_{dcn} 或轻微过载电流,考虑过载系数 k 及 1.5 倍的电流安全裕度,载流支路中 IGBT 承受的电流应满足:

$$I_{IGBT} = 1.5kI_{dcn} \quad (12)$$

直流负荷开关切负荷过程中, T_s 和 D_{L1} 的电流应力可以通过对式(5)、式(8)求导计算得出。此外,直流负荷开关仅用于关断负荷电流,对其电流关断能力的要求不高,因此载流支路中的 IGBT 不必采用并联形式。

2.3 电压应力

由于机械开关固有分闸时间存在 0.2~0.3 ms 的分散性^[16],机械开关会在延迟一段时间后才开始关断,该延迟时间内载流支路两端的电压降 u_T 全部落在开关管组上,此阶段 u_T 为源、荷两侧的电容电压差,即:

$$u_T = u_{C_s} - u_{C_L} \quad (13)$$

从经济性角度出发,机械开关延迟阶段 u_T 应尽量保持较小的数值,从而减少开关管组中的 IGBT 数量。从关断速度角度出发, u_T 越小,机械开关速度越快。在设计过程中考虑一定阈值,假设机械开关在电流转移后经过时延 t_d (通常取 0.5 ms) 达到的开距能够承担恢复电压,此前恢复电压全部由开关管组承担,这样可以大大降低 C_L ,进而节约设备成本。因此,在切负荷过程中开关管组承受的电压为:

$$U_{IGBT} = u_T(t_3 + t_d) \quad (14)$$

因此在直流负荷开关参数设计上尽量保证源侧电容的充电过程和荷侧电容的放电过程相对缓慢,使得机械开关在完全关断时两者的电压降差距不大。

3 参数设计

源、荷两侧电容的选取不仅关系电容自身成本,还影响开关管组的选型和数量,因此文中将重点分析源、荷侧电容的参数设计。以 ± 10 kV 中压直流配电网为例进行参数设计, $R_{ss} = 0.5 \Omega, L_{ss} = 0.05$ mH。根据文献[17],20 kV 的直流配电网最大传输容量为 12 MW,以 4 条直流出线为例,则每条线路的最大载荷容量为 3 MW, $L_L = 5$ mH。

负荷随机性的特点对荷侧 RLC 放电过程有较大的影响,故荷侧电容应能保证直流负荷开关在全负荷范围内动作时,机械开关关断过程中开关管组上的电压应力均低于安全阈值。由 RLC 电路可知,回路电阻越大,电容电压衰减就越慢,即线路载荷越小,直流负荷开关动作时载流支路两端承压就越小。因此,在进行电容参数设计时,应考虑各条直流出线均满载的情况。

在直流系统其他参数一定的条件下,根据式(13)可得出直流负荷开关切负荷过程中 u_T 与 C_s 和 C_L 间的关系,如图 6 所示。

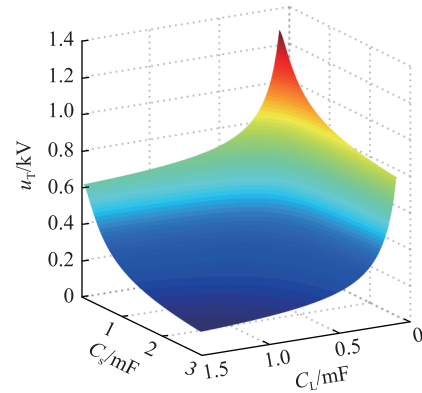


图 6 u_T 与 C_s 和 C_L 间的关系

Fig.6 Relationship between u_T and C_s, C_L

由图 6 可知, C_s 和 C_L 对 u_T 的影响均较为明显,随着 C_s 和 C_L 的增大, u_T 呈下降趋势。选取大电容能够满足直流负荷开关动作过程中开关管组电压应力要求,且可以提供近乎零电压的关断条件,但是电容的成本成倍增加,丧失了经济性。当线路满载时,源、荷侧电容的变化在开关管组上至多产生 1.3 kV 的压降。考虑 IGBT 2 倍的电压裕度,则 C_s 保证 u_T 在 0.6 kV 左右即可。

此外,为了保证所提直流负荷开关能够在任意负荷工况下关断负荷,应考虑负荷变化对 C_L 取值的影响。在全负荷范围变化时, C_L 对 u_T 的影响如图 7 所示。由图 7 可知, C_L 越大,全负荷范围的 u_T 变化程度越小,并且当 C_L 为定值时, u_T 随负荷容量的增

大而增大。

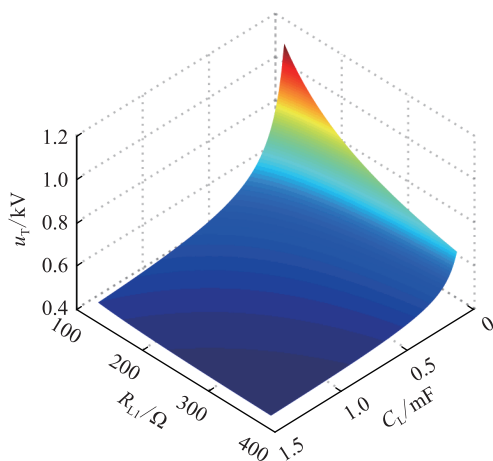


图7 u_T 与 R_{L1} 和 C_L 间的关系

Fig.7 Relationship between u_T and R_{L1}, C_L

综合对图6、图7的分析以及成本的考虑,文中 C_s, C_L 分别选取 $600 \mu\text{F}, 200 \mu\text{F}$ 。

4 仿真分析

为验证所提直流负荷开关的性能,在 Matlab/Simulink 中搭建 12 MW/20 kV 中压直流配电系统进行验证,系统额定直流电压为 $\pm 10 \text{ kV}$,系统仿真模型如图8所示,仿真主要参数如表1所示。

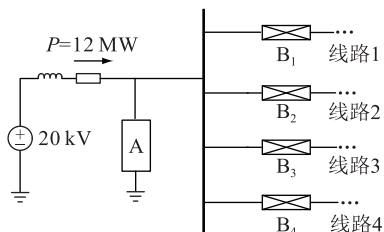


图8 系统仿真模型示意

Fig.8 Schematic diagram of system simulation model

表1 仿真主要参数

Table 1 Main parameters of simulation

参数	数值	参数	数值
L_{ss}/mH	0.05	$C_s/\mu\text{F}$	600
R_{ss}/Ω	0.5	$C_L/\mu\text{F}$	200
R_s/Ω	100	L_L/mH	5
R_{L1}/Ω	100		

在表1系统参数下,根据2.1节分析可知,直流负荷开关在关断过程中,荷侧电路工作状态唯一,即工作在过阻尼状态。2.5 s之前,直流电网正常运行,直流负荷开关各部分电容进行预充电,直至达到直流母线电压。在2.5 s时(t_1 时刻),系统对线路1下达切负荷指令,此时负荷开关开始工作,源、荷侧仿真结果分别如图9和图10所示。 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$

取值如1.2节所示。图10中, i_{Ls1}, i_{Ls2} 分别为荷侧线路1和2的电流; u_{CL1} 为荷侧线路1上电容器组 C_{L1} 两端的电压。

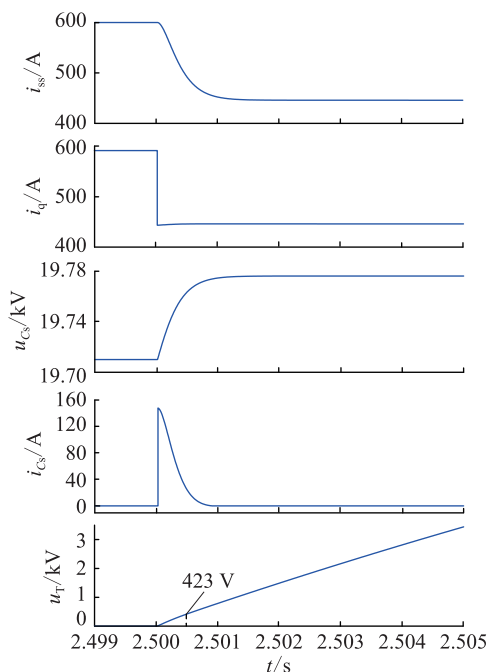


图9 源侧仿真波形

Fig.9 Source side simulation waveforms

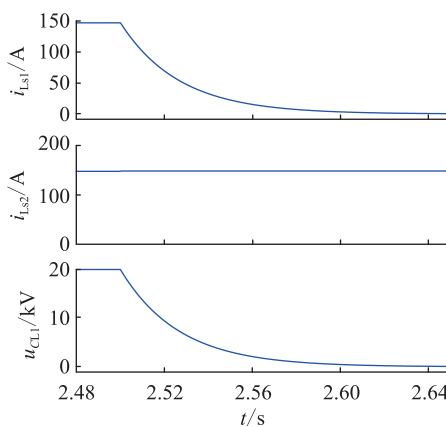


图10 荷侧仿真波形

Fig.10 Load side simulation waveforms

由图9、图10分析可知,电网正常运行时 i_{ss} 维持在 600 A,母线电压维持在 19.71 kV。系统在 t_1 时刻切除负荷,然后触发导通 T_s ,为载流支路关断后续流提供通道。在 t_2 时刻,关断 Q,载流支路被切断, C_s 转为充电状态, u_{Cs} 开始上升, C_L 通过 D_{L1} 放电, U_{CL} 下降,同时 i_{ss} 逐渐衰减至线路2—4的电流之和。在 t_3 时刻,待载流支路上电流完全转移,给予 S 分闸命令。S 动作需要一定时间,在 t_4 时刻 S 达到安全开距时,停止向 T_s 发送触发信号,使其在电流衰减到零时自然关断。此时 i_{Ls1} 最终通过荷侧充电电阻所在支路续流消耗,并经过 132 ms 衰减到零。从 u_T

波形可以看出,在负荷开关的动作期间,其承压保持很小,为 423 V,开关管组无过压危险。此外,由图 9 可知,在切负荷完成后 C_s 两端电压保持在 19.78 kV,能够支撑直流母线电压,从而保障线路 2—4 向负荷正常供电。由图 10 可知,在线路 1 上直流负荷开关动作过程中,线路 2 的电流波动很小,几乎不受线路 1 切负荷的影响。

5 结论

文中提出了一种组合电容型直流负荷开关,对其拓扑结构、工作原理、控制策略以及参数设计进行了分析,并通过仿真验证了所提拓扑能够可靠断开负荷。得到的结论如下:

(1) 文中所提直流负荷开关采用组合式结构,一方面通过共用源侧部分减小负荷开关的体积与成本,另一方面需求量较多的电力电子器件均为较低成本的晶闸管和二极管,进一步降低了设备成本,克服了混合式直流负荷开关因成本高而丧失推广性的缺陷,适用于直流母线出线数量多的直流配电网。

(2) 预充电电容在切负荷过程中能够支撑直流母线电压,保证其他线路的正常运行。通过各支路开关时序的配合,在切负荷过程中给机械开关提供低电压、零电流的关断条件,从而实现负荷电流的可靠无弧关断。

参考文献:

- [1] 李霞林,郭力,黄迪,等. 直流配电网运行控制关键技术研究综述[J]. 高电压技术,2019,45(10):3039-3049.
LI Xialin, GUO Li, HUANG Di, et al. Research review on operation and control of DC distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3039-3049.
- [2] 李博通,杨昕陆,李斌,等. 采用故障阻断型换流器的直流配电网故障处理技术综述[J]. 电力系统自动化,2020,44(5):101-113.
LI Botong, YANG Xinlu, LI Bin, et al. Overview on fault processing technology for DC distribution network based on fault blocking converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 101-113.
- [3] 王守相,刘琪,薛士敏,等. 直流配电系统控制与保护协同关键技术及展望[J]. 电力系统自动化,2019,43(23):23-30.
WANG Shouxiang, LIU Qi, XUE Shimin, et al. Key technologies and prospect for coordinated control and protection in DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 23-30.
- [4] 曾先锋,王文龙,刘永生,等. 适用于直流配电网母线保护的改进方法[J]. 电力工程技术,2020,39(4):28-33.
ZENG Xianfeng, WANG Wenlong, LIU Yongsheng, et al. Improved method for busbar protection in DC distribution network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 28-33.
- [5] 陈晓龙,韩小文,李永丽,等. 适用于 MMC 直流电网的源网配合式电容型直流断路器[J]. 中国电机工程学报,2021,41(S1):155-166.
CHEN Xiaolong, HAN Xiaowen, LI Yongli, et al. Source-network coordination type DC circuit breaker based on pre-charged capacitors for MMC DC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 155-166.
- [6] 程显,吴启亮,冯元浩,等. 基于“电压零休”的机械式直流断路器介质恢复特性研究[J]. 高压电器,2021,57(12):10-16,24.
CHENG Xian, WU Qiliang, FENG Yuanhao, et al. Study on dielectric recovery characteristic of mechanical HVDC circuit breaker based on "zero-voltage" principle [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 10-16, 24.
- [7] XIANG B, LUO J H, GAO L, et al. Study on the parameter requirements for resistive-type superconducting fault current limiters combined with mechanical DC circuit breakers in hybrid AC/DC transmission grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(6): 2865-2875.
- [8] KHAN W A, RAZA A, USMAN M R, et al. Fault interruption scheme for HVDC system using SiC-MESFET and VCB based hybrid circuit breaker [J]. IEEE Access, 2021, 9: 157371-157383.
- [9] PENG Z D, LI B, SHA X L, et al. Post-arc transient characteristics for DC vacuum circuit breaker with diode connected in series [C] // 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Wuhan, China. IEEE, 2020: 3785-3790.
- [10] 向学位,柴建云,孙旭东. 基于抑制起弧原理的中压无弧直流断路器[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):238-247.
XIANG Xuewei, CHAI Jianyun, SUN Xudong. Medium-voltage arcless DC circuit breaker based on arc suppression [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 238-247.
- [11] 蓝童琨,李银红,段献忠. 基于晶闸管的电压钳位型混合直流断路器[J]. 中国电机工程学报,2019,39(20):6159-6168,6197.
LAN Tongkun, LI Yinhong, DUAN Xianzhong. A novel voltage clamp type hybrid direct current circuit breaker based on thyristors [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 6159-6168, 6197.
- [12] 周猛,左文平,林卫星,等. 电容换流型直流断路器及其在直流电网的应用[J]. 中国电机工程学报,2017,37(4):1045-1053.
ZHOU Meng, ZUO Wenping, LIN Weixing, et al. Capacitor commutated DC circuit breaker and its application in DC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1045-1053.
- [13] ZHANG S, ZOU G B, WEI X Y, et al. Multiport hybrid DC circuit breaker with reduced fault isolation time and soft reclosing capability [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(4): 3776-3786.

[14] 刘高任,许烽,徐政,等. 适用于直流电网的组合式高压直流断路器[J]. 电网技术,2016,40(1):70-77.
LIU Gaoren, XU Feng, XU Zheng, et al. An assembled HVDC breaker for HVDC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1):70-77.

[15] 赵成勇,李帅,张继元,等. 适用于直流电网故障清除的增强型MMC[J]. 电力系统自动化,2020,44(5):60-67.
ZHAO Chengyong, LI Shuai, ZHANG Jiyuan, et al. An augmented modular multilevel converter for clearing fault in DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5):60-67.

[16] 赵文婷,袁召,方帅,等. 一种新型电容缓冲式混合高压直流断路器的设计与仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(11):41-46.
ZHAO Wenting, YUAN Zhao, FANG Shuai, et al. Design and simulation of a new type of capacitance buffering hybrid HVDC

circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11):41-46.

[17] 中国电力企业联合会. T/CEC 107—2016 直流配电电压[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
China Electric Power Enterprises Association. T/CEC 107-2016 DC distribution voltage[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

作者简介:



陈铮

陈铮(1995),男,硕士在读,研究方向为柔性直流输电技术(E-mail: chen_zheng1222@163.com);

陈武(1981),男,博士,教授,研究方向为功率电子变换技术及特种工业电源;

马建军(1992),男,博士,讲师,研究方向为直流配电与直流电网。

Assembly DC load switch based on pre-charged capacitors suitable for DC distribution network

CHEN Zheng¹, CHEN Wu¹, MA Jianjun²

(1. Center for Advanced Power-conversion Technology and Equipment, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The direct current (DC) load switch is the key equipment for constructing the DC distribution network. Aiming at the shortcomings of the existing DC load switch, such as much additional equipment, large size and complex control, an assembly DC load switch topology based on pre-charged capacitors is proposed. The working principle, control strategy and parameter design of the proposed topology are analyzed. The load switch utilizes pre-charged capacitors to form a source side part and a load side part. The load switches on the outgoing lines of multiple DC buses share the source side part, which reduces the size and cost of the equipment. In the process of load shedding, through the cooperation of source and load side capacitors, a low voltage and zero current breaking condition is provided for the mechanical switch. Finally, a simulation model is built in Matlab/Simulink to verify the feasibility and effectiveness of the proposed topology. The results show that the proposed DC load switch can reliably turn off the load current without arc which ensures the safe operation of DC distribution network. The cost of equipment required is low, which improves the economic efficiency of DC distribution network.

Keywords: direct current (DC) load switch; DC distribution network; pre-charged capacitor; combinational capacitor; mechanical switch; arcless shutdown

(编辑 吴楠)