

直流电网潮流控制与短路控制复合装置

叶 晗¹, 陈 武¹, 薛晨炀¹, 朱 旭², 梅 军¹

(1. 东南大学先进电能变换技术与装备研究所, 江苏省南京市 210096;

2. 国网江苏省电力有限公司南京供电公司, 江苏省南京市 210008)

摘要: 随着高压直流输电的发展和直流电网结构的日益复杂, 直流系统的潮流调节和短路故障问题日益突出。基于多端柔性直流输电系统的潮流控制和短路故障抑制技术, 文中提出了一种用于直流电网的兼具直流潮流控制和短路故障切除的多功能复用装置。该装置不仅能实现潮流在线路之间的灵活控制, 而且能够实现对故障电流上升速率的限制和对短路故障的切除。对一个加装了该复合装置的三端直流环网进行研究, 分析该复合装置的工作原理、控制策略及运行特性。最后, 在 PLECS 软件中搭建了仿真模型, 验证了该装置及其控制策略的可行性和有效性。

关键词: 直流输电系统; 潮流控制; 短路故障; 复合装置

0 引言

多端直流输电和直流电网技术是解决可再生能源并网的有效措施, 是电力系统未来发展的重要方向之一^[1-3]。随着直流电网范围扩大、直流节点数增加以及电网结构的复杂化, 直流系统的潮流控制和短路问题将更加突出。当潮流控制自由度不够时, 可能会导致某些线路过负荷, 甚至影响整个电网的运行^[4]。另外, 由于直流电网的低阻性, 短路电流上升非常快、峰值很大; 当短路故障发生时, 直流侧并联电容向故障点快速放电, 短时间内较大短路电流将注入故障点, 可以在几毫秒之内达到额定电流的几十倍甚至上百倍^[5-6]。此外, 直流线路一旦发生故障, 不仅可能损坏换流站器件, 而且故障可能会在短时间内扩散至整个系统, 使系统的潮流迅速崩溃, 危及整个直流电网安全。考虑到目前的故障定位和直流断路器的技术水平, 亟须对短路电流进行有效抑制, 并及时切除故障线路^[7]。

直流电网潮流仅与线路电压和电阻有关, 调节线路电阻和电压可以有效调节电网潮流。文献[8-9]提出了可变电阻器方案, 可变电阻型潮流控制器结构简单, 控制灵活, 但通态损耗大。文献[10-11]提出了直流变压器调节方案, 通过控制开关管占空

比来改变变压器两端压差, 该方案可以有效地调节系统潮流, 并具有一定的故障隔离能力。此外, 由于装置串联在直流系统中, 所以该潮流控制器承受系统级功率和电压, 因此高压场合可以采用文献[12-13]的模块化多电平换流器(MMC)技术, 减少器件所受应力。文献[14]提出了一种基于晶闸管的可调电压源电路结构实现潮流调节。该方法的调节范围大, 但是所需的器件多, 且可能给交流系统注入谐波^[15-16]。线间潮流控制器无需外部电源, 只利用线路之间的功率交换即可等效给线路串入电压源, 从而实现潮流的调节。文献[17-19]提出了一种线间潮流控制方案, 该方案不需要承受系统级的高电压, 且不需要外部电源与之交互, 成本低, 损耗低, 但会引入电压纹波。

由于直流电网短路故障电流的上升速度快、峰值大、不存在自然过零点等问题, 使得直流故障断路器成为直流电网发展的主要挑战。目前直流断路器主要分为三类: 机械型、固态型和混合型断路器。机械型直流断路器一般基于传统交流断路器, 增加振荡回路, 使得短路电流切除过程中产生过零点。固态型断路器是主要采用大功率电力电子器件, 具有开关速度快、可靠性高等优点^[20], 但是通态损耗较大。混合型直流断路器是综合了机械断路器和固态型断路器的优点, 将两者并联且进行了一定的改进, 使之具备损耗小、开断快、无关断死区等优点^[21-24]。文献[21]最早提出了一种混合型直流断路器的拓扑结构, 并验证了其可行性。

由上可知, 目前已有方案^[8-27]可分别采用增加

收稿日期: 2018-05-29; 修回日期: 2018-06-12。

上网日期: 2018-10-16。

国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904604); 先进输电技术国家重点实验室开放基金资助项目(GEIRI-SKL-2017-010)。

直流电网潮流控制装置和短路故障处理装置来单独解决直流潮流控制和故障电流抑制的问题。但是由于直流潮流控制相对频繁,而故障电流的抑制及切除仅发生在故障瞬间,其次数并不频繁,已有的两种方案不能同时兼顾直流电网稳态运行时优化潮流和故障暂态下的抑制故障电流。立足于直流电网潮流控制技术和直流断路器技术的发展现状,本文提出一种直流电网用的具有限流功能的直流潮流控制和短路控制的复合装置及其控制策略。相比于独立运行的潮流控制器和直流断路器装置,该方案可以有效减少器件数量和装置体积,减小损耗,降低成本。

1 复合装置的拓扑结构及工作原理

1.1 拓扑结构

基于线间潮流控制和直流电网混合型断路器的特点,本文提出了直流电网用的直流潮流控制与短路控制的复合装置(power flow controlling circuit breaker, PFCCB),如图 1 所示。主要由一对耦合电感(L_1 和 L_2)、两个电容(C_1 和 C_2)、四个通态运行绝缘栅双极型晶体管(IGBT)开关管($Q_1 \sim Q_4$)及其反并联二极管($D_1 \sim D_4$)、四个二极管($D_{b1} \sim D_{b4}$)、两个快速机械开关(UFD₁ 和 UFD₂)和三个故障转移开关管(MB₁ ~ MB₃)及与其并联的避雷器(SA₁ ~ SA₃)组成。该复合装置主要的功能为直流电网线路的潮流调节、短路电流抑制和直流故障线路切除。

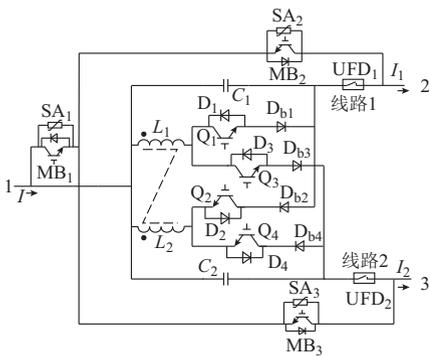


图 1 PFCCB 拓扑
Fig.1 Topology of PFCCB

正常工作状态:稳态情况下, C_1, C_2, L_1, L_2 和 $Q_1 \sim Q_4$ 所在支路参与系统的潮流调节,UFD₁ 和 UFD₂ 处于闭合状态,MB₁ ~ MB₃ 处于关断状态。

故障隔离状态:当该复合装置连接的直流线路上发生故障,即使潮流控制的 $Q_1 \sim Q_4$ 导通,作为短路控制的换流开关管,同时闭锁直流潮流控制环节。耦合电感的存在抑制短路电流的快速上升。通过 MB₁ ~ MB₃ 将故障电流转移其所在支路上,从而关断故障所在支路上的快速机械开关,实现故障支

路的切除。在故障支路切除之后,切断 MB₁ ~ MB₃,使得非故障支路恢复运行。

1.2 工作原理

为实现直流电网潮流的有效调节和短路故障的控制,只需将该复合装置如图 1 所示串入线路中,复合装置的 1 端与换流站相连,2 端、3 端分别串入被控线路 1 和线路 2 中。下面以两种典型工况为例,对该直流电网用的具备直流潮流控制与短路控制的复合装置控制特性进行分析(以图 1 中的标示方向作为各电气量的参考正方向)。

1.2.1 I_1 及 I_2 相同方向

1) 潮流控制

短路故障未发生的情况下,系统的短路控制部分闭锁,即 MB₁ ~ MB₃ 断开,潮流控制部分投入工作。由于装置的对称性,选取 I_1 和 I_2 均为正方向的情况进行说明。根据系统的对称性,以减小 I_1 、增大 I_2 为例进行潮流调节,即等效线路 1 引入一个正电阻,线路 2 引入一个负电阻,此时电容的电压方向与图 1 参考方向一致。当开关管 $Q_1 \sim Q_4$ 均关断时,电容 C_1 电压值 V_{C1} 不断增大、电容 C_2 电压值 V_{C2} 不断减小;为了维持一个周期内的电压平衡, C_1 中的能量需转移到 C_2 中。

根据电容电压极性及能量转移路径,首先开通 Q_1 ,则 Q_1, D_{b1}, C_1 和 L_1 形成电流回路,电容 C_1 向 L_1 储能,电感电流上升;然后关断 Q_1 ,开通 Q_3 ,此时 L_1, Q_3, D_{b3} 和 C_2 形成回路,电感 L_1 向电容 C_2 传递能量,电感电流下降,这样形成一个开关周期,将能量从电容 C_1 向 C_2 的传递,从而实现减小 I_1 、增大 I_2 。具体开关模态见附录 A 图 A1。

2) 短路控制

由于 I_1 和 I_2 方向相同,根据对称性,以线路 1 的出口处短路为例。

线路 1 发生故障时,立即开通开关管 Q_1 与 Q_3 ,关断开关管 Q_2 与 Q_4 ,此时开关管 Q_1 与 Q_3 所在支路则为故障换流支路。延时一段时间,开通开关管 MB₁ ~ MB₃,此时故障电流部分转移到 MB₁ ~ MB₃ 开关管所在支路。再延时一段时间,关闭故障支路上的开关管 Q_1 ,然后在零电流状态下关断高压快速机械开关 UFD₁,切断故障支路。待机械开关完全关断之后,关断开关管 MB₁, MB₂ 和 MB₃,使得剩余故障电流通过避雷器 SA₁ 和开关管 MB₂ 的反并联二极管进行导通和消耗。具体开关模态如附录 A 图 A2 所示。此时,故障支路已从系统中切除,非故障支路恢复运行。当系统故障处理之后,可进行重合闸操作。先开通转移支路开关管,然后闭合载流支路,可靠导通之后,关断转移支路开

关管。此时复合装置将恢复潮流控制和短路控制功能。

1.2.2 I_1 和 I_2 不同方向

1) 潮流控制

由于对称性,以 I_1 正向、 I_2 反向,且增大 I_1 、减小 I_2 为例进行潮流调节,即等效线路 1 引入一个负电阻,线路 2 引入一个正电阻,此时 C_1 的电压极性与图 1 相反, C_2 的电压极性与图 1 相同。当开关管 $Q_1 \sim Q_4$ 均关断时, V_{C1} 不断减小、 V_{C2} 不断增大,因此 C_2 的能量需转移到 C_1 中。根据能量转移路径,首先开通 Q_4 ,此时 C_2, D_{b4}, Q_4 和 L_2 形成回路,电容 C_2 向电感 L_2 储能;然后关断 Q_4 ,开通 Q_1 ,耦合电感的作用下, L_1, Q_1, D_{b1} 和 C_1 形成回路,能量从电感 L_1 向电容 C_1 传递,在一个周期内实现能量从电容 C_2 传递到电容 C_1 中,从而实现增大 I_1 、减小 I_2 。具体开关模态见附录 A 图 A3 所示。

2) 短路控制

以 I_1 正向、 I_2 反向且线路 1 出口处短路为例。当线路 1 发生故障时,立即开通开关管 Q_1 和 Q_4 ,关断开关管 Q_2 和 Q_3 ,此时开关管 Q_1 和 Q_4 所在支路则为故障换流支路。延时一段时间,开通开关管 $MB_1 \sim MB_3$,此时故障电流大部分转移到 MB 开关管所在支路。再延时一段时间,关闭故障支路上的开关管 Q_1 ,然后关断高压快速机械开关 UFD_1 ,切断故障支路。继续延时一段时间,之后关断开关管 $MB_1 \sim MB_3$,使得剩余故障电流通过 SA_1 和开关管 MB_2 的反并联二极管进行流通和消耗。具体开关模态如附录 A 图 A4 所示。此时,故障支路已从系统中切除,非故障支路恢复运行。

1.3 特性分析

以某三端直流环网为例,对所提直流电网潮流控制与短路控制的复合装置特性进行分析。加装了 PFCCB 的三端电网如图 2 所示,各线路上未加装 PFCCB 一侧需要配置直流断路器使用。其中换流站 1 和换流站 2 采取的是定功率控制,功率分别为 P_1 和 P_2 ,换流站 3 采取的是定电压控制,电压为 V_3 。

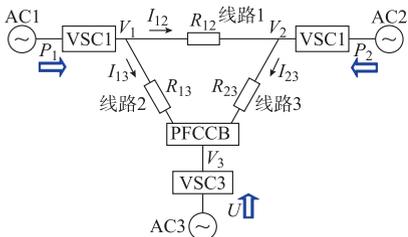


图 2 三端环网直流输电结构
Fig.2 DC transmission structure of three-terminal ring network

加装该复合装置后,该直流系统的潮流方程为

$$\begin{cases} I_{12} = \frac{V_1 - V_2}{R_{12}} \\ I_{13} = \frac{V_1 + V_{C2} - V_3}{R_{13}} \\ I_{23} = \frac{V_2 - V_{C1} - V_3}{R_{23}} \\ V_{C1} I_{23} = V_{C2} I_{13} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_1 = V_1^2 \left(\frac{1}{R_{13}} + \frac{1}{R_{12}} \right) - V_1 \left(\frac{V_3 - V_{C2}}{R_{13}} + \frac{V_2}{R_{12}} \right) \\ P_2 = V_2^2 \left(\frac{1}{R_{23}} + \frac{1}{R_{12}} \right) - V_2 \left(\frac{V_3 + V_{C1}}{R_{23}} + \frac{V_1}{R_{12}} \right) \end{cases} \quad (2)$$

由于直流电网阻抗较小,结合式(1)和式(2)可知,在 V_{C1} 和 V_{C2} 较小的变化范围内,即可实现直流电网潮流较大的调节范围,装置具有较好的潮流控制能力。

由于复合装置中存在着电感和电容,正常工作情况下会发生谐振问题。以附录 A 图 A1(a)中工况为例,其谐振回路为 $C_1-L_1-Q_1-D_{b1}$, $i_{L1}(t)$ 和 $V_{C1}(t)$ 的表达式为:

$$\begin{cases} V_{C1}(t) = e^{-\alpha t} (A_1 \cos(\omega_d t) + A_2 \sin(\omega_d t)) \\ i_{L1}(t) = -\alpha e^{-\alpha t} (A_1 \cos(\omega_d t) + A_2 \sin(\omega_d t)) + e^{-\alpha t} \omega_d (-A_1 \sin(\omega_d t) + A_2 \cos(\omega_d t)) \\ \alpha = \frac{R}{2L_1} \\ \omega_d = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1} - \alpha^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: R 为 L_1 和 C_1 谐振回路中的等效电阻; A_1 和 A_2 为根据实际应用中 $i_{L1}(0)$ 和 $V_{C1}(0)$ 来求定的待定系数; α 为衰减系数; ω_d 为衰减谐振角频率。

为满足电容电压纹波及直流系统限流问题,复合装置的电容 C_1, C_2 和耦合电感 L_1, L_2 需满足以下条件:

$$C_1 \geq \frac{I_{C1}^2}{f_s \Delta V_{ref} (I_{C1} + I_{C2})} \quad (4)$$

$$C_2 \geq \frac{I_{C2}^2}{f_s \Delta V_{ref} (I_{C1} + I_{C2})} \quad (5)$$

$$L_{eq1} = L_1 + M + \frac{M(L_2 + M)}{M + L_2 + M} \quad (6)$$

$$L_{eq2} = L_2 + M + \frac{M(L_1 + M)}{M + L_1 + M} \quad (7)$$

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} \quad (8)$$

$$\min(L_1, L_2, L_{eq1}, L_{eq2}) \geq L_{s,ref} \quad (9)$$

式中: f_s 为复合装置的工作频率; ΔV_{ref} 为电容电压

纹波最大允许值; I_{C1} 和 I_{C2} 分别为流过电容 C_1 和 C_2 的平均值; L_{eq1} 和 L_{eq2} 分别为耦合作用下两个电感的等效感值; $L_{s,ref}$ 为直流电网中限流电感的最小值; M 为耦合部分感值; k 为耦合系数。

由式(3)至式(9)可以看出,要减小正常工作下谐振电流的峰值大小,降低对系统的损害,可适当增大电感 L_1 ,但太大的电感不利于系统潮流调节的动态性能。同时,由于复合装置中 $D_{b1} \sim D_{b4}$ 的存在,可有效避免谐振过程的重复进行,减少对开关器件的破坏。

2 PFCCB 的控制策略

根据以上分析,PFCCB 复合装置的控制分为正常情况下的潮流控制与短路故障情况下的故障线路控制。

潮流控制:正常工作情况下,由 PFCCB 复合装置拓扑结构的对称性以及上述分析的 9 种工况的对称性,依据线间潮流控制器的基本控制思想^[28-29],附录 A 中表 A1 给出各种工况下开关管的通断特性以及被控器件。

短路控制:当直流系统发生短路故障时,PFCCB 复合装置控制流程如图 3 所示。

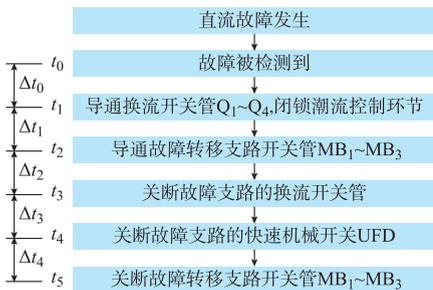


图 3 PFCCB 短路故障切除工况的操作时序
Fig.3 Operation timing of PFCCB at shortcut

1) 短路故障发生在某时刻,经过一段时间,在 t_0 时刻检测到故障,开始触发 PFCCB 复合装置的短路故障控制模式。

2) 经过 t_0 延时,在 t_1 时刻立即导通 $Q_1 \sim Q_4$, 闭锁潮流控制环节。

3) 经过 Δt_1 延时,在 t_2 时刻导通转移支路的开关管 $MB_1 \sim MB_3$,将故障电流转移到转移支路上,以便于故障支路的有效关断。

4) 经过 Δt_2 的通信延时,在 t_3 时刻关断故障支路上的换流开关管,切断故障支路上转移之后剩余的小电流。

5) 经过 Δt_3 延时,在 t_4 时刻关断故障支路上的快速机械开关 UFD,将故障支路从直流系统中切除

出去。

6) 经过 Δt_4 的分断时间,在 t_5 时刻将转移支路上的开关管 $MB_1 \sim MB_3$ 关断,使得故障电流消耗在避雷器组成的吸收回路中;此时故障支路已从直流系统中切除出去,非故障支路恢复正常运行。

随着直流电网保护方案的优化,通信设备的改进以及高速机械开关的研制水平不断上升,每个阶段的动作延时可进一步缩小,断路器的整体工作时长将随着缩短。

3 仿真验证

图 2 所示的三端直流电网线路参数如表 1 所示。换流站 VSC1 和 VSC2 为定功率模式运行,分别向系统注入的功率为 $P_1 = 300$ MW, $P_2 = 120$ MW;换流站 VSC3 以定电压模式运行,控制其直流电压为 $U_3 = 200$ kV。PFCCB 复合装置接入在 VSC3 换流站的出口侧,连接着线路 2 和线路 3,即电容 C_1 串入在线路 3 中,电容 C_2 串入在线路 2 中。PFCCB 的参数为: $C_1 = 1\ 600$ μ F, $C_2 = 4\ 000$ μ F,电感 L_1 和 L_2 的取值均为 80 mH,耦合系数 k 为 0.8。

表 1 直流电网输电线路参数
Table 1 Line parameters of the DC grid

线路	输电线路参数		
	长度/km	电阻/ Ω	电感/mH
线路 1	100	1.0	40
线路 2	200	2.0	80
线路 3	150	1.5	60

以下主要从正常情况下的潮流控制、故障情况下的限流特性、短路切除以及故障后的潮流控制四个方面进行仿真验证。

1) 正常潮流控制

设 PFCCB 复合装置正常工作情况下,需要控制线路电流 $I_{23} = 0.25$ kA。

根据式(1)和式(2)的直流系统潮流方程,结合三个换流站的功率和电压,可以算得: $I_{12} = -0.33$ kA, $I_{13} = 1.80$ kA, $I_{23} = 0.25$ kA, $V_1 = 204.76$ kV, $V_2 = 205.26$ kV, $V_{C1} = 4.63$ kV, $V_{C2} = 0.64$ kV。直流系统潮流控制模块在 4 s 时开始工作,控制线路电流 $I_{23} = 0.25$ kA,仿真结果如图 4 所示。从图 4(a)至(c)可以看出,仿真结果与理论分析基本一致,电流 I_{23} 在较短的时间内被控制到预设目标 0.25 kA,且暂态过程较为平滑。换流站均工作在正常的电压等级下,潮流控制的效果较好。

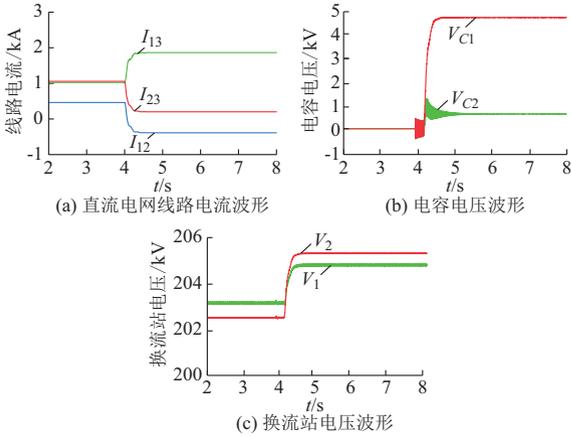


图4 正常潮流控制的波形

Fig.4 Waveforms in normal power flow control

2) 短路故障下的故障线路切除

初始时刻,系统处于正常工作情况,在8 s前,PFCCB复合装置的潮流控制部分投入系统工作,控制线路电流 $I_{23} = 0.5$ kA,系统稳定运行。

在8 s时,线路2发生短路故障,PFCCB的短路控制部分投入系统工作,及时将故障线路从系统中切除,仿真结果如图5所示。

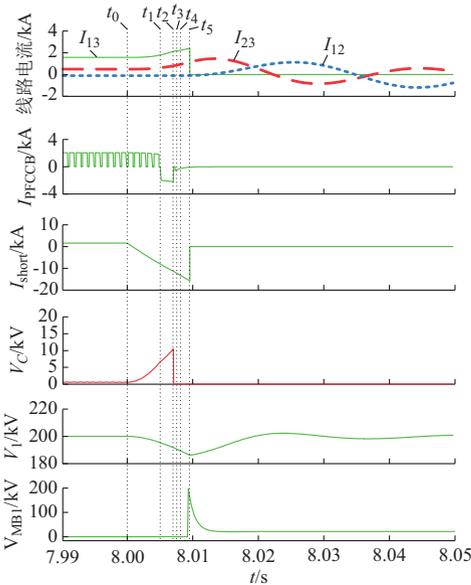


图5 直流故障情况下短路控制的波形

Fig.5 Waveforms in DC fault short cut control

直流系统的低阻性、低惯量,使得短路点电流 I_{short} 迅速增大,故障线路电容 V_C 迅速充电。从图5中可以看出,线路2发生短路故障之后,线路电流 I_{13} 迅速增加, t_1 时刻检测到故障,立即闭锁潮流控制部分同时使得故障电流进入故障换流支路,换流支路电流 I_{PFCCB} 上升; t_2 时刻 PFCCB 复合装置打开转移支路开关 $MB_1 \sim MB_3$,此时故障电流进入转移

支路,故障线路的电容电压 V_C 开始下降,避免过压; t_3 时刻关断换流支路的换流开关管,切断故障线路的剩余电流 I_{PFCCB} ; t_4 时刻,在零电流的状态下切断故障线路的机械开关 UFD; t_5 时刻关断转移支路开关,使得故障支路完全从系统中切除。从 V_{MB1} 的波形可以看出,故障转移支路开关管在切除过程中承受短时间的系统级电压。PFCCB 复合装置在 10 ms 之内将故障支路切除出去,非故障支路在短路切除后恢复运行。由图中的 V_1 波形可以看出,系统在短路切除之后,换流站迅速将电压控制到 200 kV,避免直流系统的崩溃;同时由于故障切除过程中换流支路通过电流较小,不会出现电感的磁饱和问题。

3) 短路故障下的限流

短路故障发生时,当系统导通开关管 $Q_1 \sim Q_4$, 作为故障换流支路时,此时耦合电感起到了限流的作用。在短路故障的情况下,为了研究限流效果,对系统中是否存在电感的情况分别进行仿真,结果如附录 A 图 A5 所示。从图中可以看出,耦合电感的存在,明显减缓了故障电流的上升速率。与单独的电感不同,耦合电感由于存在其他绕组正常工作电流的影响,起初会迅速上升到一个比最终峰值低很多的电流水平,然后平缓上升。从附录 A 图 A5(b) 中短路发生之后的瞬间来看,在故障切除过程的数个毫秒之内,短路电流的峰值因为耦合电感的存在被大幅降低。

为进一步研究 PFCCB 复合装置中耦合电感的限流特性及其电感值的选取,针对不同的耦合电感值进行仿真研究,电感值分别取值为 80 mH, 400 mH 和 1 600 mH 时的仿真结果如附录 A 图 A6 所示。从图 A6(a) 中可以看出,随着耦合电感的增大,短路电流的上升速度减缓,电感值越大,抑制短路电流的效果越好;但从图 A6(b) 中可知,在短路故障发生后 PFCCB 装置切除故障的几毫秒内,不同电感值下的短路电流上升速率和峰值较为接近。同时,PFCCB 中耦合电感值的太大会导致直流电网潮流控制的动态性能变差、装置的体积增大等问题,因此在满足限流条件的情况下尽可能选取相对较小的电感值有利于 PFCCB 装置性能的提升。

4 与其他方案的对比分析

当前的直流电网中,潮流控制与短路切除装置处于单独运行的状态,要实现潮流控制和短路切除的功能,需两个装置分别投入电网。已有的线间直流潮流控制装置是 Alstom 公司的六开关方

案^[17-18],工程上较为成熟的直流断路器是 ABB 公司的混合型直流断路器方案^[21]。以六开关潮流控制和 ABB 混合断路器组合(以下称方案 A)与本文的 PFCCB 装置,在如图 2 所示的典型应用场景下(涉及一个换流站及两条直流支路),进行对比分析。假定直流系统的硬件配置采用 ABB 公司的 5SNA 3000K452300 型的 IGBT 元件,其额定电压、额定电流分别为 4.5 kV 和 1.5 kA。正常情况下,其安全承压为 2.25 kV,该器件可承受 6 kA 过电流约 1 ms。

对于方案 A 来说,潮流控制器和混合断路器是独立地运行于直流电网中。当短路故障发生时,没有潮流控制的保护环节,开关管需要承受短路期间可能存在的过流和过压。已知断路器断开故障时,断路器两端产生的过压是系统级电压,为 200 kV,考虑一倍的裕度,取 400 kV,则需要 $[400/2.25]=178$ 开关管串接($[\cdot]$ 为取整运算),且考虑线路的双向导通能力,则混合断路器的转移支路上,需要开关管 $178 \times 2=356$ 个;又因为涉及两条线路,开关管数量为 $356 \times 2=712$ 个,换流支路上需要切断换流开关管 2 个,潮流控制部分需要开关管 6 个;故障情况下,短路电流峰值约 10 kA, $[10/6]=2$,需要增加 1 条并联支路,所以 IGBT 开关管的所需数量为 $(712+2+6) \times 2=1440$ 个。

对于本文提出的 PFCCB 来说,直流潮流控制部分与短路控制部分统一的控制。短路故障发生时,潮流控制环节闭锁,考虑直流短路切除环节的过压问题,有 $[400/2.25]=178$ 。由于复合装置拓扑转移支路自身形成的反串联结构,可保证双向导电,所以转移支路上需 $178 \times 3=534$ 个开关管,潮流控制和换流支路需 4 个开关管;考虑过流问题时,同样需要 IGBT 并联支路,则需要的 IGBT 数量为 $(534+4) \times 2=1076$ 个。结果对比如表 2 所示,由表可知,与潮流控制器和混合直流断路器单独运行情况相比,本文所提出的 PFCCB 所需的 IGBT 开关管数量减少近 30%,较大幅度地降低了装置的成本,且系统潮流调节过程中引起的纹波很小,动态性能优越,技术性和经济性较好。

由于本文所提方案增加使用了耦合电感,在系统中起到能量传输和故障限流作用,可能需要考虑过电压问题和磁饱和问题;另一方面,复合装置中的潮流控制为线间潮流调节,若其中一条线路被切除,则潮流控制功能消失。实际应用中,上述缺陷均可以通过合理设计元器件参数、优化系统配置来克服。

5 结语

本文提出了一种直流电网用的潮流控制与短路控制的复合装置,它不仅能够实现直流电网中潮流的有效调节,而且可以在直流电网发生短路时,对短路电流的上升速率和峰值进行有效抑制,并及时切除短路故障。由于故障时承受大电流、高电压器件为非复用部分,因此该复合装置不会因为内部故障的频繁检修影响系统的正常运行。与传统的直流潮流控制和直流断路器单独运行相比,该装置有效地减少了电力电子器件的使用,降低了系统成本。特别地,潮流与短路复合控制装置有助于未来直流电网设备的多功能化,减小设备的体积,有利于进一步优化直流电网的架构。最后,通过在 PLECS 软件中搭建一个环网三端直流模型,验证了本文装置的可行性和有效性。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 孙蔚,姚良忠,李琰,等.考虑大规模海上风电接入的多电压等级直流电网运行控制策略研究[J].中国电机工程学报,2015,35(4):776-785.
SUN Wei, YAO Liangzhong, LI Yan, et al. Study on operation control strategies of DC grid with multi-voltage level considering large offshore wind farm grid integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 776-785.
- [2] 姚良忠,吴婧,王志冰,等.未来高压直流电网发展形态分析[J].中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [3] 汤广福,罗湘,魏晓光.多端直流输电与直流电网技术[J].中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [4] JOVICIC D, HAJIAN M, ZHANG H, et al. Power flow control in DC transmission grids using mechanical and semiconductor based DC/DC devices [C]// Proceedings of the 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, December 4-5, 2012, Birmingham, UK: 1-6.
- [5] CHANG B, CWIKOWSKI O, BARNES M, et al. Point-to-point two-level converter system faults analysis[C]// 7th IET

表 2 PFCCB 与方案 A 的对比

Table 2 Comparison between PFCCB and scheme A

方案	潮流控制 环节 IGBT 数量/个	短路切除 环节 IGBT 数量/个	开关管总 数量/个	潮流调 节纹波 大小	故障限 流作用
方案 A	12	1 428	1 440	大	较好
PFCCB 方案	8	1 068	1 076	小	好

- International Conference on Power Electronics, April 8-10, 2014, Manchester, UK; 1-6.
- [6] YANG J, FLETCHER J E, O' REILLY J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.
- [7] 仇雪娜, 赵成勇, 庞辉, 等. 基于 MMC 的多端直流输电系统直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 140-145.
- ZHANG Xuena, ZHAO Chengyong, PANG Hui, et al. A control and protection scheme of multi-terminal DC transmission system based on MMC for DC line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 140-145.
- [8] MU Q, LIANG J, LI Y, et al. Power flow control devices in DC grids[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA.
- [9] ROUZBEHI K, MIRANIAN A, LUNA A, et al. Towards fully controllable multi-terminal DC grids using flexible DC transmission systems[C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 14-18, 2014, Pittsburgh, USA: 5312-5316.
- [10] NATORI K, OBARA H, YOSHIKAWA K, et al. Flexible power flow control for next-generation multi-terminal DC power network[C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 14-18, 2014, Pittsburgh, USA: 778-784.
- [11] KUMAR B P, TOMAS J, SUBHASISH M, et al. DC-DC converter based load flow control in HVDC grids: 12/037957 [P]. 2010-09-20.
- [12] KISH G J, LEHN P W. A modular bidirectional DC power flow controller with fault blocking capability for DC networks [C]// 2013 IEEE 14TH Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), June 23-26, 2013, Salt Lake City, USA: 1-7.
- [13] KENZELMAN S. Modular DC/DC converter for DC distribution and collection networks[D]. Lausanne, Swiss; École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2012.
- [14] VEILLEUX E, OOI B T. Multiterminal HVDC with thyristor power-flow controller [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1205-1212.
- [15] KUMAR B P, SUBHASISH M, TOMAS J, et al. Series-connected DC/DC converter for controlling the power flow in a HVDC power transmission system: PCT WO 20: 12/037964 [P]. 2012-03-29.
- [16] BALASUBRAMANIAM S, LIANG J, UGALDE-LOO C. An IGBT based series power flow controller for multi-terminal HVDC transmission [C]// 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), September 2-5, 2014, Cluj-Napoca, Romania: 1-6.
- [17] BARKER C D, WHITEHOUSE R S. A current flow controller for use in HVDC grids [C]// 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, December 4-5, 2012, Birmingham, UK: 1-5.
- [18] WHITEHOUSE R S, BARKER C D. Current flow controller: PCT EP 20: 13/061313[P]. 2018.
- [19] DENG N, WANG P, ZHANG X. A DC current flow controller for meshed modular multilevel converter multiterminal HVDC grids[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(1): 43-51.
- [20] 彭振东, 任志刚, 姜楠, 等. 新型直流固态限流断路器设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1028-1037.
- PENG Zhendong, REN Zhigang, JIANG Nan, et al. Design and analysis for a novel DC solid state current limiting circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1028-1037.
- [21] CALLAVIK M, BLOMBERG A, HAFNER J, et al. The hybrid HVDC breaker: an innovation breakthrough enabling reliable HVDC grid [EB/OL]. [2012-11-01]. <http://pdfs.semanticscholar.org/091b/d48720f02610f646b83a7b60a257690f540.pdf>.
- [22] 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): 1045-1052.
- 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): 1045-1052.
- [23] LIU G, XU F, XU Z, et al. Assembly HVDC breaker for HVDC grids with modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 931-941.
- [24] KESHAVARZI D, FARJAH E, GHANBARI T. A hybrid DC circuit breaker and fault current limiter with optional interruption capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2330-2338.
- [25] SAU-BASSOLS J, PRIETO-ARAUJO E, GOMIS-BELLMUNT O. Modelling and control of an interline current flow controller for meshed HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 11-22.
- [26] 朱思丞, 赵成勇, 李帅, 等. 可隔离直流故障的直流电网用 DC/DC 变换器拓扑[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 108-115. DOI:10.7500/AEPS20170727001.
- ZHU Sicheng, ZHAO Chengyong, LI Shuai, et al. DC/DC converter topology with DC fault isolation capability application for DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 108-115. DOI: 10.7500/AEPS20170727001.
- [27] 李斌, 何佳伟, 冯亚东, 等. 多端柔性直流电网保护关键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 2-12. DOI: 10.7500/AEPS20160601011.
- LI Bin, HE Jiawei, FENG Yadong, et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 2-12. DOI: 10.7500/AEPS20160601011.
- [28] CHEN W, ZHU X, YAO L, et al. An interline DC power-flow controller (IDCPFC) for multiterminal HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 2027-2036.
- [29] CHEN W, ZHU X, YAO L, et al. A novel interline DC Power-flow controller (IDCPFC) for meshed HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1719-1727.

直流输电及电力电子在电力系统中的应用。E-mail: yehannjust@163.com

陈 武(1981—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:高压直流输电及电力电子技术。E-mail: chenwu@seu.

edu.cn

薛晨炀(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力电子技术、直流变压器。E-mail: xue_chen_yang@126.com

(编辑 张焱)

Unified Device of Power Flow Control and Short Circuit Control for DC Power Grid

YE Han¹, CHEN Wu¹, XUE Chenyang¹, ZHU Xu², MEI Jun¹

(1. Center for Advanced Power-conversion Technology and Equipment, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Nanjing Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd., Nanjing 210008, China)

Abstract: With the rapid development of high voltage direct current (HVDC) transmission and the increasing complex structure of DC power grid, DC power-flow regulation and short circuit fault interruption have become more and more prominent. Based on the technology of interline direct current power flow controller and fault suppression, this paper proposes a novel unified device of power flow controlling circuit breaker (PFCCB) for DC power grid, which combines power flow controller and DC circuit breaker. The PFCCB can not only adjust the power flow flexibly between two lines, but also curb the short current and cut off the fault line in time. Its operating principles, control strategy and performance are analyzed in a three-terminal meshed grid with PFCCB. Simulation is also made with PLECS software and the results validate the feasibility and effectiveness of PFCCB.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFB0904604) and the State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (No. GEIRI-SKL-2017-010).

Key words: high voltage direct current (HVDC) transmission; power-flow regulation; short circuit fault; unified device