

一种适用于混合式高压直流断路器 负载换流开关的新型缓冲电路

刘程卓,王渝红,龚 鸿,王 媛
(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要:基于混合式高压直流断路器的工作原理,提出了一种新型的负载换流开关缓冲电路。该电路通过 2 个绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的简单控制,在混合式高压直流断路器分闸时,能阻断缓冲电容经超快速机械开关的放电通路;在混合式高压直流断路器短时间多次动作时,能保证缓冲电容每一次过电压的吸收效果,提高混合式高压直流断路器的速动性和可靠性。

关键词:混合式高压直流断路器;负载换流开关;缓冲电路;柔性直流输电;IGBT

中图分类号:TM 561

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.03.028

0 引言

高压直流断路器作为直流输电的关键技术之一,是直流电网运行、控制、保护的基础。混合式高压直流断路器因其具有可靠性高、动作迅速、损耗低等特点,在直流系统中最具实用性。虽然混合式高压直流断路器的结构多样^[1-3],但载流支路通常由负载换流开关 LCS(Load Commutation Switch)和超快速机械开关 UFD(Ultra Fast Disconnect)串联组成。

LCS 作为混合式高压直流断路器正常载流和故障换流的关键,其两端缓冲电路的保护作用显得尤为重要。文献[4]给出了常用于绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的由电阻、电容、二极管(RCD)组成的缓冲电路结构,此结构简单,能有效抑制尖峰电压,实用性强。文献[5]提出的缓冲电路通过在放电回路中使用电感元件,在不降低过电压吸收效果的前提下,极大地缩短了吸收电容放电时间。文献[6]针对低压直流断路器提出了一种充放电电容可变的缓冲电路,可以满足 IGBT 不同开关频率的要求。虽然 IGBT 的缓冲电路结构多样^[7-9],但绝大部分缓冲电

路会通过 UFD 进行放电,上述几种缓冲电路也不例外,这会导致 UFD 的分断电流增加,混合式高压直流断路器的分闸时间延长^[10-12]。为了解决上述问题,文献[13]给出了 3 种改进 RCD 的缓冲电路。这 3 种缓冲电路都能有效阻断缓冲电容通过 UFD 放电,但却无法较好地配合混合式高压直流断路器的短时间多次动作。

为此,本文在阐述混合式高压直流断路器工作原理的基础上,分析了采用 LCS 缓冲电路的必要性;提出了一种新型的缓冲电路,并进一步讨论了其控制策略及参数选取;通过 Simulink 仿真验证了所提电路的有效性。

1 混合式高压直流断路器的工作原理

ABB 公司在 2012 年研发的混合式直流断路器是高压直流断路器发展史中的一个重大里程碑,其拓扑结构如图 1 所示^[1]。该断路器包括载流支路和主开断 MB(Main Breaker)支路两部分,载流支路由 LCS 和 UFD 组成,MB 支路由多个分元件组成,每个分元件都是由相同数量的 IGBT 串并联组成,且每个

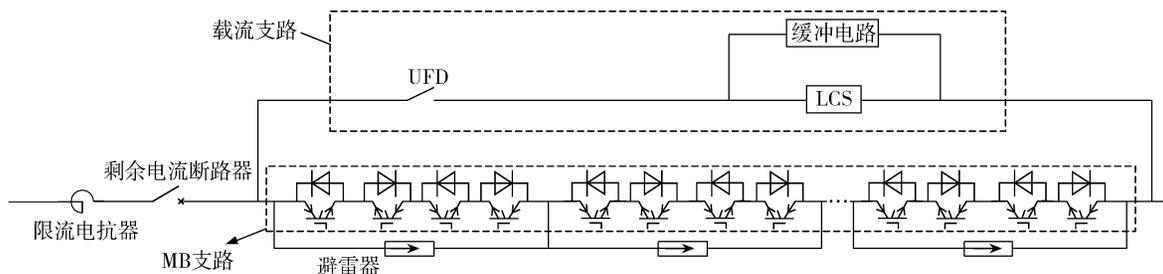


图 1 混合式高压直流断路器结构图

Fig.1 Topology diagram of hybrid HVDC breaker

收稿日期:2017-02-20;修回日期:2017-11-15

基金项目:国家重点研发计划项目(SQ2017YFGX100043)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(SQ2017YFGX100043)

分元件都并联避雷器作为吸能回路。

正常运行时,UFD 触头处于闭合状态,LCS 导通,MB 断开,负载电流经 UFD 和 LCS 组成的载流支路流通。因 UFD 是采用金属触头的机械开关,且 LCS 只有少量的 IGBT 器件,故断路器通态损耗较小。故障发生后,电流快速增加,引起保护系统动作,触发 LCS 断开,同时触发 MB 导通,迫使故障电流向 MB 支路转移。电流转移完成后,UFD 在零电流下快速分断,解决了灭弧难题。当 UFD 打开至额定开距后,触发 MB 断开,最终由避雷器实现能量耗散。很小的剩余电流由剩余电流断路器断开,将故障线路与高压直流输电网隔离,同时避免了避雷器组的热超载。

实际情况下,混合式高压直流断路器的合闸动作应先控制 UFD 的触头闭合,使 LCS 导通前有一定的正向压降,以保证 LCS 能正常触发导通;混合式高压直流断路器的分闸动作应先触发 LCS 断开,以保证 MB 能正常触发导通。故 LCS 与 UFD 的动作不同步,LCS 直接承受系统电压。然而 LCS 仅由少量 IGBT 组成,如此高的系统电压必然会导致 IGBT 击穿,因此给 LCS 配置缓冲电路十分必要。

2 一种新型的 LCS 缓冲电路

2.1 新型缓冲电路的提出

为克服现有缓冲电路的不足,结合混合式高压直流断路器的开断原理,针对 LCS 提出一种新型的缓冲电路,其结构如图 2 所示。该缓冲电路由 IGBT 反并联二极管开关 S_3 、 S_4 ,电阻 R_{s1} 、 R_{s2} ,二极管 V_{Ds} 以及缓冲电容 C_s 组成。

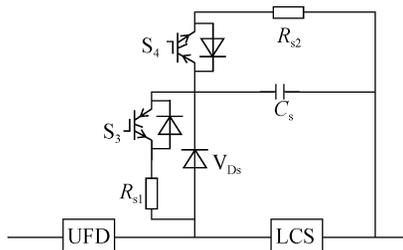


图 2 新型缓冲电路结构图

Fig.2 Topology diagram of novel snubber circuit

新型 LCS 缓冲电路的提出主要基于如下 2 个关键点。

a. 阻断缓冲电容经 UFD 放电,缩短混合式高压直流断路器的分闸时间。在传统 RCD 缓冲电路的模型上引入 S_3 ,当断路器分闸时,通过触发 S_3 分断来阻断缓冲电容 C_s 经 UFD 放电。

b. 提高混合式高压直流断路器短时间多次动作的可靠性。缓冲电路要配合断路器短时间多次动作,难点在于降低缓冲电容在断路器每次动作后的剩余电压,即为缓冲电容提供一条有效的放电通路。

S_4 的引入为缓冲电路构造了一条新的并联放电支路,通过合理的控制,该支路能在缓冲电容充电时有较大的阻值,在缓冲电容放电时有较小的阻值,既能保证缓冲电路有较好的缓冲效果,又可以降低每次动作后缓冲电容的剩余电压。

2.2 控制策略

由以上分析可知,新型缓冲电路中 IGBT 采用合理的控制策略是保证其有效性的前提。

2.2.1 合闸时新型缓冲电路的控制策略

在混合式高压直流断路器合闸时, S_4 一直处于断开状态, S_3 的初始状态为断开, S_3 的控制逻辑与 LCS 相同。

在混合式高压直流断路器合闸动作前,UFD 触头处于完全分断状态,且 LCS、MB 都处于断开状态。

混合式高压直流断路器合闸动作开始,先控制 UFD 触头闭合,再触发导通 LCS。在 UFD 完全闭合后到 LCS 接收到导通信号前,电流经二极管 V_{Ds} 和缓冲电容 C_s 开始充电。当 LCS 接收到导通信号时, S_3 也接收到导通信号,LCS 和 S_3 同时导通,缓冲电容 C_s 经由小电阻 R_{s1} 和 LCS 放电。至此,混合式高压直流断路器完成一次合闸动作。

2.2.2 分闸时新型缓冲电路的控制策略

在混合式高压直流断路器分闸时, S_3 的控制逻辑不变,初始状态为导通; S_4 的初始状态为断开,其导通信号与 UFD 的触头分离信号同步,开断信号与 MB 的开断信号同步。

混合式高压直流断路器分闸动作前,UFD 的触头闭合,LCS 处于导通状态,MB 处于断开状态。

混合式高压直流断路器分闸动作开始,LCS 与 S_3 同时接收到开断信号触发开断,随后 MB 接收到导通信号触发导通, S_4 仍处于断开状态,二极管 V_{Ds} 导通,缓冲电容 C_s 开始充电。当电流由载流支路向 MB 支路完全转移后,载流支路的电流减小为 0,由此产生控制信号,使 UFD 触头开始进行分断,并触发 S_4 导通。因 UFD 为机械开关,触头完全分断需要一定的时间,在这段时间内,缓冲电容 C_s 通过导通的 S_4 和 R_{s2} 迅速放电,而且因 S_3 处于关断状态,缓冲电容不会经由 UFD 和 MB 放电;当 UFD 触头完全分断后,MB 和 S_4 同时接收到开断信号触发开断,并最终由吸能支路进行能量耗散。至此,混合式高压直流断路器完成一次分闸动作。

2.3 参数选取

2.3.1 合闸时新型缓冲电路的参数选取

混合式高压直流断路器合闸时的等效电路如图 3 所示。图中,开关 S_1 、 S_2 分别为 LCS、UFD; L 为断路器的限流电抗器; U_{dc} 、 R_1 分别为直流电源、直流负荷。

假设缓冲电容 C_s 无初始电压,在 $t_0 = 0$ 时刻,

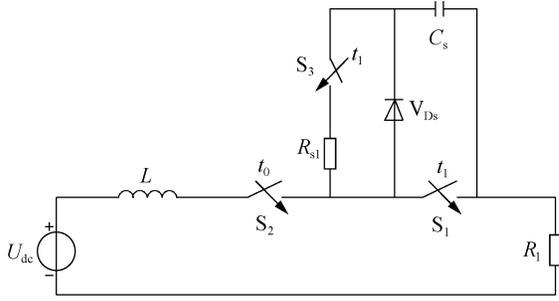


图3 混合式高压直流断路器合闸时等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of hybrid HVDC breaker during closing time

UFD 触头闭合(开关 S_2 闭合),直流断路器合闸动作开始,则在 t_0-t_1 时间段内电路方程为:

$$\begin{cases} U_{dc} = L \frac{di_0}{dt} + u_{c0} + R_l i_0 \\ i_0 = C_s \frac{du_{c0}}{dt} \\ u_{c0}(t_0^+) = u_{c0}(t_0^-) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, u_{c0} 为在 t_0-t_1 时间段内电容 C_s 上的电压; i_0 为在 t_0-t_1 时间段内流经电感 L 的电流。

在 t_1 时刻, LCS、 S_3 同时导通(开关 S_1 、 S_3 闭合),直流断路器完成合闸动作,则在 t_1 时刻后,针对缓冲电路可得电路方程为:

$$\begin{cases} C_s \frac{du_{c1}}{dt} + \frac{u_{c1}}{R_{s1}} = 0 \\ u_{c1}(t_1^+) = u_{c1}(t_1^-) = u_{c0}(t_1) \end{cases} \quad (2)$$

其中, u_{c1} 为在 t_1 时刻后电容 C_s 上的电压。

若发生断路器合闸于故障的情况,放电电阻 R_{s1} 需在保护再次动作前对缓冲电容完全放电,同时为了保证缓冲电容 C_s 能对 LCS 起较好的保护作用,放电电阻 R_{s1} 和缓冲电容 C_s 需满足以下条件:

$$\begin{cases} \ln 15 R_{s1} C_s \leq \frac{t_p}{3} \\ \frac{du_{c0}}{dt} < \frac{A}{n} \\ u_{c0}(t_1) < \frac{B}{n} \end{cases} \quad (3)$$

其中, t_p 为保护动作时间; A 为 LCS 中 IGBT 所能承受的最大电压变化率; B 为 LCS 中 IGBT 所能承受的最大电压; n 为 LCS 中 IGBT 串联的个数。

2.3.2 分闸时新型缓冲电路的参数选取

混合式高压直流断路器分闸时的等效电路如图4所示。图中, S_1 、 S_2 、 L 、 U_{dc} 、 R_l 与合闸时含义相同; 开关 S_5 为 MB; L_s 为 UFD 和 MB 的杂散电感; R_m 为 MB 的电阻; 开关 S 和电阻 R_f 用于模拟接地故障。

假设缓冲电容 C_s 无初始电压,在 $t_0=0$ 时刻之前, LCS 和 UFD 一直处于导通状态(开关 S_1 、 S_2 已长

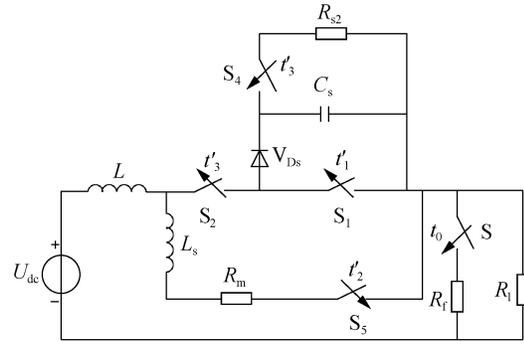


图4 混合式高压直流断路器分闸时等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of hybrid HVDC breaker during breaking time

时间闭合)。在 $t_0=0$ 时刻,系统突然发生接地故障(开关 S 在 t_0 时刻闭合),可得电路方程为:

$$\begin{cases} U_{dc} = L \frac{di'_0}{dt} + R_l i'_0 \\ i'_0(t'_0^-) = i'_0(t'_0^+) = \frac{U_{dc}}{R_l} \end{cases} \quad (4)$$

其中, i'_0 为在 $t'_0-t'_1$ 时间段内流经电感 L 的电流。

在 t'_1 时刻,保护动作,直流断路器开始分闸动作, LCS 断开(开关 S_1 断开),则在 $t'_1-t'_2$ 时间段内电路方程为:

$$\begin{cases} U_{dc} = L \frac{di'_1}{dt} + u'_{c1} + R_l i'_1 \\ i'_1 = C_s \frac{du'_{c1}}{dt} \\ u'_{c1}(t'_1^+) = u'_{c1}(t'_1^-) = 0 \\ i'_1(t'_1^+) = i'_1(t'_1^-) = C_s \frac{du'_{c1}}{dt}(t'_1^-) = i'_0(t'_1) \end{cases} \quad (5)$$

其中, i'_1 为在 $t'_1-t'_2$ 时间段流经电感 L 的电流; u'_{c1} 为在 $t'_1-t'_2$ 时间段电容 C_s 上的电压。

在 t_2 时刻, MB 导通(开关 S_5 闭合),故障电流由载流支路向 MB 支路转移,则在 $t'_2-t'_3$ 时间段电路方程为:

$$\begin{cases} U_{dc} = L \frac{di'_2}{dt} + u'_{c2} + R_l i'_2 \\ i'_2 = C_s \frac{du'_{c2}}{dt} + i'_{21} \\ u'_{c2} = L_s \frac{di'_{21}}{dt} + R_m i'_{21} \\ u'_{c2}(t'_2^+) = u'_{c2}(t'_2^-) = u'_{c1}(t'_2) \\ i'_{21}(t'_2^+) = i'_{21}(t'_2^-) = 0 \\ i'_2(t'_2^+) = i'_2(t'_2^-) = \\ C_s \frac{du'_{c2}}{dt}(t'_2^-) + i'_{21}(t'_2^-) = i'_1(t'_2) \end{cases} \quad (6)$$

其中, i'_2 为在 $t'_2-t'_3$ 时间段流经电感 L 的电流; i'_{21} 为

在 $t'_2-t'_3$ 时间段流经电感 L_s 的电流; u'_{c2} 为在 $t'_2-t'_3$ 时间段电容 C_s 上的电压。

在 t'_3 时刻, 载流支路电流减小为 0, UFD 触头开始分断, 几乎同时 S_5 触发导通 (开关 S_2 开始断开、 S_5 闭合), 则在 t'_3 时刻后, 针对缓冲电路可得电路方程为:

$$\begin{cases} C_s \frac{du'_{c2}}{dt} + \frac{u'_{c3}}{R_{s2}} = 0 \\ u'_{c3}(t'_3^+) = u'_{c3}(t'_3^-) = u'_{c2}(t'_3) \end{cases} \quad (7)$$

其中, u'_{c3} 为在 t'_3 时刻后电容 C_s 上的电压。

为了使 S_5 与 MB 同时分断时保证缓冲电容 C_s 能对 LCS 起较好的保护作用, 放电电阻 R_{s2} 和缓冲电容 C_s 需满足以下条件:

$$\begin{cases} \ln 15 R_{s2} C_s \leq \frac{t_{\text{UFD}}}{3} \\ \frac{du'_{c1}}{dt} < \frac{A}{n} \\ \frac{du'_{c2}}{dt} < \frac{A}{n} \\ u'_{c2}(t'_3) < \frac{B}{n} \end{cases} \quad (8)$$

其中, t_{UFD} 为 UFD 完全分断的时间。

综上所述, 为了保证缓冲电路的有效性, 新型缓冲电路中各个元件参数的选取应同时满足式 (3) 和式 (8)。

3 不同缓冲电路的仿真对比

为了验证新型缓冲电路能阻断缓冲电容经 UFD 放电, 而且能在混合式高压直流断路器短时间多次动作时降低每次动作后缓冲电容的电压, 本文在 320 kV/2 kA 的简化直流系统中搭建混合式直流断路器的模型^[14-15], 并作如下假设: 直流系统在 0.1 s 发生永久性故障; 当故障电流超过 2.4 kA 2 ms 后 (保护系统延时), 混合式直流断路器开始分闸动作; 当故障电流切断 60 ms 后对混合式高压直流断路器进行合闸; 当合闸于故障后, 混合式高压直流断路器的第二次分闸情况与首次分闸基本一致。基于以上假设, 对 LCS 分别配置 RCD 缓冲电路、改进 RCD 缓冲电路^[13]、新型缓冲电路进行仿真。

3.1 UFD 分断电流对比

因混合式高压直流断路器 2 次分闸情况基本一致, 故只选取首次分闸过程中的 UFD 电流进行对比分析, 其仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 当 LCS 配置 RCD 缓冲电路时, 在载流支路向固态主开关支路换流过程中, UFD 电流正向减小为 0 后, 其电流还会反向增加至 0.4 kA 左右, 该反向电流就是缓冲电容经 UFD 的放电电流。应注意 UFD 是一个机械开关, 在 UFD 电流正向减小为 0 后, 其触头开始分断。显然, 由缓冲电

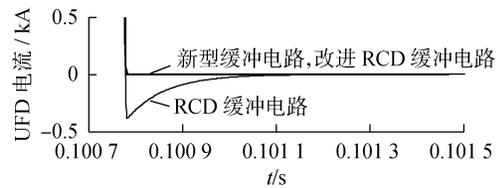


图 5 分闸时 UFD 的电流曲线

Fig.5 Curves of UFD current during breaking time

容提供反向电流会增加 UFD 的分断电流, 致使 UFD 触头完全分断所需要的时间呈毫秒级延长^[10]。而混合式高压直流断路器完成一次分闸动作时间仅需 5 ms, 可以看出 RCD 缓冲电路中缓冲电容经 UFD 的放电电流, 对混合式直流断路器的速动性影响非常大。当 LCS 配置新型缓冲电路或改进 RCD 缓冲电路时, UFD 不存在反向电流, 保证了 UFD 触头的零电流分断, 缩短了混合式高压直流断路器的分闸时间。

3.2 缓冲电容电压对比

当混合式高压直流断路器短时间多次动作时, 为了准确对比 3 种缓冲电路中缓冲电容电压, 在保证首次缓冲效果一致的情况下进行仿真, 仿真结果如图 6 所示。

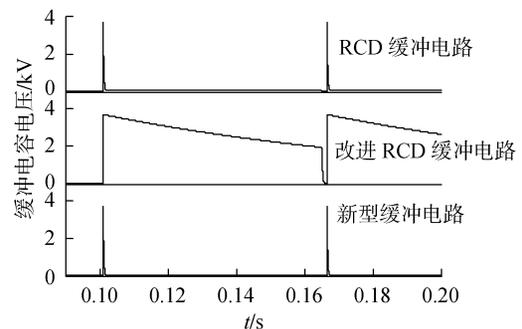


图 6 混合式高压直流断路器短时间多次动作时缓冲电容电压曲线

Fig.6 Curve of snubber capacitor voltage for hybrid HVDC breaker's several actions in a short time period

由图 6 可知, 0.1 s 时, 混合式高压直流断路器进行首次分闸, 3 种缓冲电路的缓冲电容初始电压都为 0, 因此在首次分闸过程中, LCS 两端的电压都是从 0 开始变化, 此时只要合理地选择缓冲电容的大小, 3 种缓冲电路都能对 LCS 中的 IGBT 起到较好的缓冲保护作用。在混合式高压直流断路器首次分闸结束之后到重合闸开始之前 (0.1~0.165 s), RCD 缓冲电路中的缓冲电容电压维持在一个较小值, 改进 RCD 缓冲电路中的缓冲电容电压较大且衰减缓慢, 而新型缓冲电路中的缓冲电压几乎一直保持为 0。0.165 s 时, 混合式高压直流断路器重合闸, 改进 RCD 管缓冲电路中的缓冲电容剩余电压最大, RCD 缓冲电路中次之, 新型缓冲电路中最小。因此, 在 UFD 闭合之后到 LCS 导通之前, 缓冲

电容的剩余电压会直接加于 LCS 两端,此时配置了新型缓冲电路的 LCS 发生失效的可能性会大幅降低。

在混合式高压直流断路器重合闸结束到第二次分闸开始之前,RCD 缓冲电路和改进 RCD 缓冲电路中的电容通过导通的 LCS 迅速放电,故在混合式高压直流断路器第二次分闸开始时,3 种缓冲电路中缓冲电容上的初始电压都为 0,第二次分闸与首次分闸情况完全一致。

为了更加准确地说明在混合式高压直流断路器短时间多次动作时,3 种缓冲电路对 LCS 保护作用的差异,由仿真数据可计算得到 LCS 在混合式高压直流断路器每次动作时所承受的电压变化率,如表 1 所示。可见,在重合闸时,新型缓冲电路 LCS 两端所承受的电压变化率明显低于其他 2 种缓冲电路,LCS 中 IGBT 失效的可能性最低,提高了混合高压直流断路器短时间多次动作的可靠性。

表 1 混合式高压直流断路器每次动作时 LCS 电压变化率

Table 1 Voltage change rate of LCS for hybrid HVDC breaker's each action

缓冲电路	电压变化率/(kV·μs ⁻¹)		
	首次分闸	重合闸	第二次分闸
RCD 缓冲电路	0.23	>0.73	0.23
改进 RCD 缓冲电路	0.23	>1.91	0.23
新型缓冲电路	0.23	≈0	0.23

4 结论

本文针对混合式高压直流断路器 LCS,提出一种新型缓冲电路。通过合理地控制 IGBT 模块,该缓冲电路可以阻断缓冲电容经 UFD 放电,减小 UFD 的分断电流,提高混合式高压直流断路器的速动性;能有效降低混合式高压直流断路器每次动作后缓冲电容的剩余电压,在混合式高压直流断路器短时间多次开断的场合中,提高混合式高压直流断路器的可靠性。

参考文献:

- [1] HÄFNER J, JACOBSON B. Proactive hybrid HVDC breakers - a key innovation for reliable HVDC grids[C]//CIGRE International Symposium. Bologna, Italy:[s.n.], 2011:264-273.
- [2] DAVIDSON C C, WHITEHOUSE R S, BARKER C D, et al. A new ultra-fast HVDC circuit breaker for meshed DC networks[C]//IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham, UK:IET, 2015:1-7.
- [3] 中国科学院研究所. 一种混合型直流断路器:201410077459.1 [P]. 2014-03-04.
- [4] 邢岩,岩曦,王莉娜. 电力电子技术基础[M]. 北京:机械工业出版社,2008:144-150.
- [5] 王鹏程,刘强. 一种新型吸收电路在光伏逆变器中的应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(10):112-116.

WANG Pengcheng, LIU Qiang. Application of new snubber circuit in photovoltaic inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10):112-116.

- [6] 刘顺炮,郑建勇,查申森,等. 基于新型混合式断路器的缓冲电路研究[J]. 电力自动化设备,2006,26(3):31-34.
LIU Shunpao, ZHENG Jianyong, ZHA Shensen, et al. Research on IGBT snubber based on hybrid circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(3):31-34.
- [7] BONGKOO K, JAE-JUNG Y, CHANG-HYEON S, et al. Passive snubber for reducing switching-power losses of an IGBT in a DC-DC Boost converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12):6332-6341.
- [8] BRÜCKNER T, SADOWSKI P, JAKOB R. Snubbed high-power press-pack IGBT converter [C]//European Conference on Power Electronics and Applications. Lille, France:IEEE, 2013:1-7.
- [9] LIM T C, WILLIAMS B W, FINNEY S J. Active snubber energy recovery circuit for series-connected IGBTs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(7):1879-1889.
- [10] 黄瑜珑,张祖安,温伟杰,等. 高压直流断路器中电磁斥力快速驱动器研究[J]. 高电压技术,2014,40(10):3171-3178.
HUANG Yulong, ZHANG Zuan, WEN Weijie, et al. Research on an ultrafast driver for HVDC circuit breaker with electromagnetic repulsion mechanism [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10):3171-3178.
- [11] 袁志方,庄劲武,王晨,等. 高速断路器的 10 kV/10 kA 介质恢复试验系统关键技术[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):168-173.
YUAN Zhifang, ZHUANG Jingwu, WANG Chen, et al. 10 kV/10 kA dielectric recovery test system for high-speed isolators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6):168-173.
- [12] 袁志方,庄劲武,陈倩,等. 开断速度对电磁斥力高速断路器介质恢复特性的影响[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):140-146.
YUAN Zhifang, ZHUANG Jingwu, CHEN Qian, et al. Influence of breaking speed on dielectric recovery characteristic of high-speed electro-magnetic repulsion isolator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7):140-146.
- [13] HASSANPOOR A, HÄFNER J, JACOBSON B. Technical-assessment of load commutation switch in hybrid HVDC breaker [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10):5393-5400.
- [14] MARTINEZ J A, MAGNUSSON J. EMTF modeling of hybrid HVDC breakers [C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Denver, CO, USA:IEEE, 2015:1-5.
- [15] 朱童,余占清,曾嵘,等. 混合式直流断路器模型及其操作暂态特性研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):18-30.
ZHU Tong, YU Zhanqing, Zeng Rong, et al. Transient model and operation characteristics researches of hybrid DC circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1):18-30.

作者简介:



刘程卓

刘程卓(1994—),女,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电(E-mail:l_chengzhuo@163.com);

王渝红(1971—),女,重庆人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制、新能源接入等(E-mail:yuhongwang@scu.edu.cn);

(下转第 217 页 continued on page 217)

transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 2368-2378.

- [16] 李黎,张登,谢龙君,等. 采用关联规则综合分析和变权重系数的电力变压器状态评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 152-159.

LI Li, ZHANG Deng, XIE Longjun, et al. A condition assessment method of power transformers based on association rules and variable weight coefficients[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 152-159.

- [17] 谢龙君,李黎,程勇,等. 融合集对分析和关联规则的变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 277-286.

XIE Longjun, LI Li, CHENG Yong, et al. A fault diagnosis method of power transformers by integrated set pair analysis and association rules[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 277-286.

- [18] WITTEN I H, FRANK E, HALL M A. 数据挖掘[M]. 李川,张永辉,译. 北京:机械工业出版社, 2014.

- [19] 刘文奇. 均衡函数及其在变权综合中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(4): 58-64.

LIU Wenqi. Balanced function and its application for variable weight synthesizing[J]. Systems Engineering: Theory and Practice, 1997, 17(4): 58-64.

作者简介:



孙鹏

孙鹏(1972—),男,云南昆明人,高级工程师,博士,主要从事电力设备故障诊断及技术管理工作,技术方向为输变电设备状态评估、运维及检修(E-mail: ynsp@163.com);

黄绪勇(1974—),男,云南昆明人,高级工程师,博士,主要从事电力设备状态监测及评估、电力大数据应用分析等研究(E-mail: 15504024@qq.com);

耿苏杰(1990—),女,江苏邳州人,博士研究生,主要从事输变电设备数据挖掘算法研究(E-mail: gengsj0110@126.com);

王秀利(1966—),男,河北邱县人,教授,博士研究生导师,主要从事生产调度与数据挖掘方法等方面的研究(E-mail: wangdu0816@163.com)。

Dynamic assessment of power transformer status based on real-time monitoring and experimental data

SUN Peng¹, HUANG Xuyong¹, GENG Sujie², WANG Xiuli²

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Company Limited, Kunming 650217, China;

2. School of Economics and Management, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Considering the difference and complementarity between reflecting the current status of power transformers through on-line monitoring and preventive test data, a dynamic assessment method of power transformer status is proposed. Based on a dynamic index evaluation system, the timeliness-based score function is presented for each status variable. Meanwhile, based on the history samples and dynamic assessment time, the weights of the score functions are calculated by the combination of confidence of association rules and time-varying parameters. The weight varying formulas are introduced to balance the uneven degradation levels of comprehensive status indices. Results of experimental data show that the correct rate of the proposed method is 92.1%.

Key words: power transformers; status assessment; dynamic status assessment; data timeliness; association rule; varying weight

(上接第209页 continued from page 209)

龚鸿(1992—),男,四川南充人,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电(E-mail: xinyuesuedu@163.com);

王媛(1994—),女,四川南充人,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电(E-mail: yuanwang_de@163.com)。

Novel snubber circuit for load commutation switch of hybrid HVDC breaker

LIU Chengzhuo, WANG Yuhong, GONG Hong, WANG Yuan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A novel snubber circuit for LCS (Load Commutation Switch) is proposed based on the principle of the hybrid HVDC (High Voltage Direct Current) breaker. Through the simple control of two IGBTs, the snubber circuit can protect the snubber capacitor from being discharged through UFD (Ultra Fast Disconnecter) when breaker opening, and ensure that the snubber circuit has an effective absorption of overvoltage for the hybrid HVDC breaker's several actions in a short period of time, which improves the quickness and reliability of the hybrid HVDC breaker.

Key words: hybrid HVDC breaker; load commutation switch; snubber circuit; flexible HVDC power transmission; Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT)