

基于 LCL 故障电流控制器的故障快速检测

袁晓冬¹, 史明明¹, 杨景刚¹, 葛雪峰¹, 尹靖元²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

摘要:相较于交流配电网, 直流配电网存在故障电流限流、阻断和电能质量治理等多种问题。为减少直流系统中设备的数量, 文中提出了一种基于 LCL 型多功能故障电流控制器拓扑结构, 使其同时具备故障限流、故障阻断和电压调节功能。首先针对该拓扑结构, 研究其在限流、阻断和电压调节等不同工作目标下的运行工作原理, 分析 LCL 结构的滤波和限流复用过程, 提出故障电流的快速检测方法。然后, 通过对限流器件不同位置电压变化率和电流变化率的阈值匹配, 实现双极故障、单极故障和高阻故障等多类型故障的快速判断。最后, 搭建系统仿真模型, 验证了该故障电流控制器拓扑同时具备调压、限流和阻断等功能, 且能够快速检测故障电流。

关键词:直流电网; 故障电流控制器; LCL 结构; 故障限流; 故障检测

中图分类号: TM77

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)04-0067-08

0 引言

随着电力电子技术的发展, 相比交流配电网, 直流配电网在线路成本、输电损耗、供电可靠性等方面具有优势, 可有效提高供电容量与电能质量, 充分发挥分布式能源的价值和效益。因此, 兼具可靠性、安全性、稳定性、经济性的直流配电网具有巨大的市场潜力和经济价值^[1-4]。

相较交流配电网, 直流配电网中同样存在着故障限流阻断和电能质量治理的问题^[5-6]。当直流线路发生故障时, 短路电流迅速上升, 因此需要在线路中串联接入限流装置, 抑制故障电流的上升率^[7-8]。同时直流电网故障发生后, 由于没有自然过零点, 需要断路装置进行故障阻断, 保护线路负载^[9-11]。

在直流环网中, 线路数量大于电源终端数量, 导致线路上潮流分配和线路阻抗相关, 重载线路长时间运行增加线路故障率^[12-14]。文献[15-17]指出通过增加潮流控制器进行潮流调度, 实现线路之间潮流解耦。在直流配网末端, 由于线路阻抗原因, 导致末端电压低于额定电压, 影响末端电能质量^[18]。文献[19]指出在线路中增加电压调节装置, 实现对馈线末端电能质量补偿。潮流调度和电压调节需要长时间运行, 而故障限流阻断是瞬时性故障, 如将多种功能集成到一种设备, 可有效减少系统装置数量, 降低系统成本。

为实现潮流调度、电压补偿和故障下限流阻

断, 文中提出了基于 LCL 型的多功能故障电流控制器。通过串联接入线路可调直流源, 改变线路等效阻抗, 实现潮流和电压的调节; 通过串联接入限流器件和反向电压, 实现对故障的快速限流和阻断。针对多功能故障电流控制器, 提出故障快速检测方法, 实现多种类型故障的快速可靠检测。

1 LCL 型多功能故障电流控制器工作原理

LCL 型多功能故障电流控制器的原理见图 1。

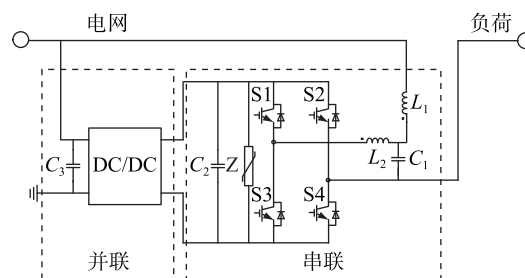


图 1 LCL 型故障电流控制器拓扑结构

Fig.1 Topology of fault current controller based LCL

由图 1 可知, 该拓扑结构采用串并联连接结构, 在电网侧并联接入 DC/DC, 用于提供补偿能量, 并维持中间直流电压(电容 C_2 电压)的稳定, 同时直流电容并联避雷器 Z, 防止电压过高。串联侧通过 H 桥电路和 LCL 型滤波器连接电网和负荷之间。稳态时, H 桥电路通过 LCL 滤波器在电网和负荷之间输出可控直流电压, 实现对线路潮流和电压的调节。故障时, LCL 滤波器起到限流作用, 当封锁脉冲后, 电容 C_2 电压可串联到线路, 起到故障电流快速阻断的作用。稳态时, 电感 L_2 和电容 C_1 主要起到滤除谐波电压的作用, 此时 L_1 相当于线路电感。当发

生故障时,电感 L_1 起到限流作用,并通过电感 L_1 和电容 C_1 的谐振,可快速降低故障电流,并通过电感 L_2 对直流电容充电,进一步实现故障阻断。因此 LCL 结构起到故障和稳态滤波的复用功能。

图 1 中并联侧部分的 DC/DC 需要采用隔离型拓扑,例如双主动全桥(dual active bridge, DAB) DC-DC 结构,如图 2 所示,故障电流控制器等效电路如图 3 所示。

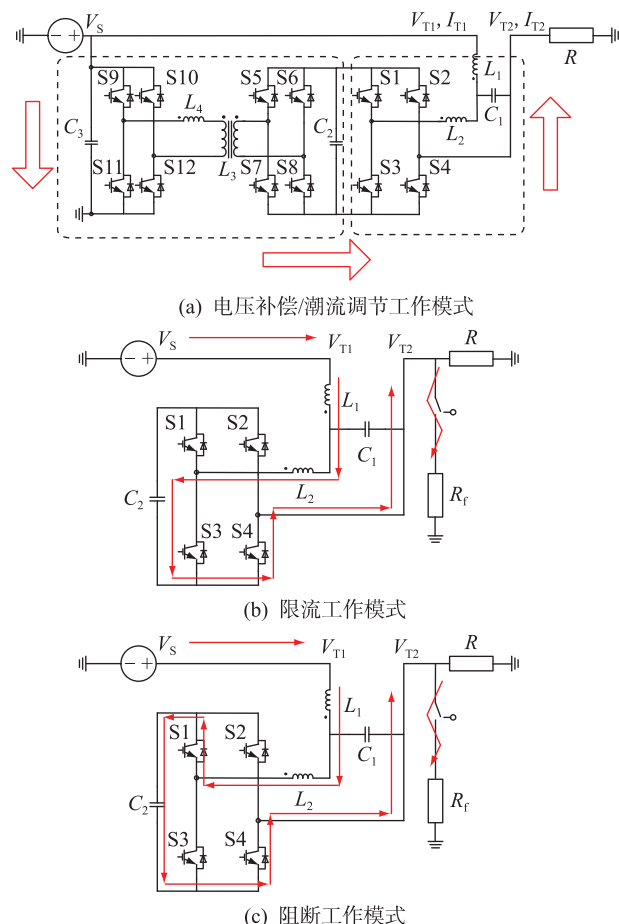


图 2 故障电流控制器工作原理

Fig.2 Schematic diagram of fault current controller

图 2(a) 为稳态时控制电压和潮流示意图,其中 R 为负载, R_f 为短路阻抗, V_s 为线路电压, S_1 — S_4 为串联侧开关器件, L_1, L_2, C_1 为串联侧滤波器。 V_{T1}, V_{T2} 分别为直流电网电源侧电压和负荷侧电压,串联部分进行电压源控制,使其输出补偿电压 $V_{T0} = V_{T2} - V_{T1}$,通过调整 V_{T0} 值即可实现对负荷电压的补偿。在直流线路里,潮流控制实际上也是通过改变线路压降来实现的,故通过改变 V_{T0} 值同样可实现对线路潮流调节的作用。补偿电压所需能量通过并联侧从电网吸收实现。

图 2(b) 是故障电流控制器工作在限流模式示意图,当检测到故障时,H 桥两下管 S_3, S_4 导通(或者两上管 S_1, S_2 导通),此时 LCL 限流器件投入线

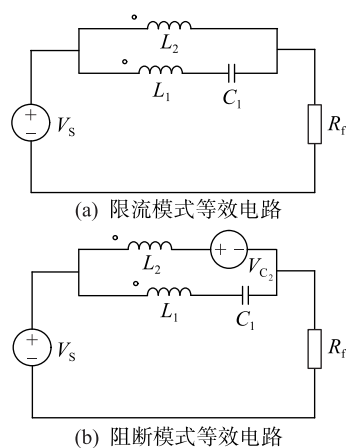


图 3 故障电流控制器等效电路

Fig.3 Equivalent circuit diagram of fault current controller

路中,等效电路如图 3(a) 所示,故障电流首先通过 L_1 和 C_1 振荡限制其故障电流上升率,在 L_1 和 C_1 谐振周期时间故障电流开始下降。同时在谐振周期内故障电流控制器进行判断或接受系统指令,是否需要故障阻断,如不需要则维持次状态,如需要则切换到阻断模式。图 2(c) 是故障电流控制器工作在阻断模式的示意图,当接受到系统故障分断指令时,封锁 H 桥脉冲,故障电流通过 IGBT 反并联二极管将直流电容 C_2 串联接入线路中,等效示意图如图 3(b) 所示,由于 C_2 的方向电压存在,使得线路故障电流快速下降,实现故障电流完全阻断。

多功能故障电流控制器的设计思路在于稳态时通过并联侧提供能量,故障时通过串联侧滤波器提供限流阻断功能。基于此方式,图 1 的拓扑结构可根据实际情况进行适当的调整。例如并联侧 DC/DC 也可采用其他结构的隔离型拓扑,或者取缔并联侧,在中间直流侧接入储能电池,用来实现电压补偿和潮流控制的作用,类似于交流电网中的动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)。串联侧 H 桥结构也可根据具体需求进行调整,例如当直流线路电压为 1 500 V 时,可考虑采用三电平结构,实现装置的效率优化。

在真双极的直流配电网中,需要正负极母线同时接入故障电流控制器,并进行正负极的独立控制,实现双极的独立电压补偿、潮流调节和故障限流阻断。真双极结构下的多功能故障电流控制器拓扑结构如图 4 所示。稳态工作时,无论电压补偿还是潮流控制,核心思路都是实现对线路电压的调节,即调节图 2(a) 中 V_{T1} 和 V_{T2} 之间电压。因此图 2(a) 中串联侧需要进行电压环控制,实现电压暂降、暂升和脉动电压补偿。

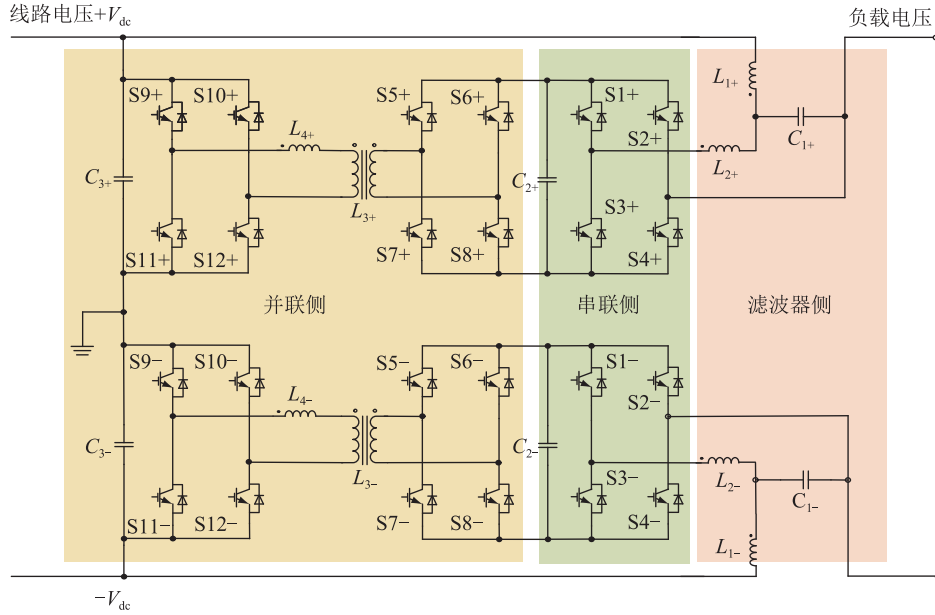


图4 真双极故障电流控制器拓扑结构

Fig.4 Topology of true bipolar fault current controller

图5给出故障电流控制器稳态调压控制过程。图5(a)采用电压外环电流内环的双环控制,增加电流环实现动态性能提升,同时采用比例积分谐振(proportional integral resonance, PIR)控制器,可实现对负载电压指令 $V_{T2_REF}^*$ 的无静差脉动响应。并联侧提供补偿能量,需要稳定中间直流电压,采用单电压环比例积分(proportional integral, PI)控制器即可,如图5(b)所示。

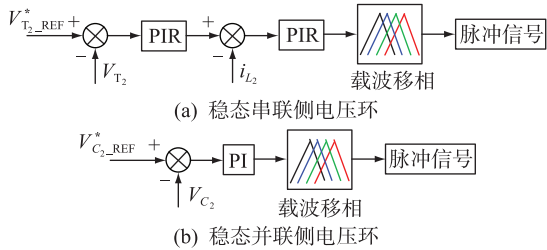


图5 故障电流控制器稳态控制

Fig.5 Steady state control of fault current controller

2 故障电流控制器故障快速检测方法

文中故障电流控制器由于采用LCL结构,通过对两个电感电流的分别采样,可实现对故障的快速判断。文中以故障电流控制器中限流电感的电压变化率和限流电容的电流变化率为基准,对两组变量进行综合比对后,对为故障判断特征量,设计了故障检测方案。由于故障电流控制器可能安装在真双极结构中,同时需要区分短路故障和高阻故障,因此故障检测方案包括故障极识别和故障类型判断。在此基础上,故障电流控制器还可通过限流模式和阻断模式的切换,实现瞬时性故障和永久性

故障的穿越。

2.1 故障检测方案

直流故障发生后,故障线路上限流电感 L_1 和 L_2 的电压变化率迅速增大,电容 C_1 的电流变化率同样迅速发生变化,远远大于非故障线路的限流器件电压电流变化率。与传统故障判断只能通过限流电感电压变化率判断不同,故障电流控制器限流器更为复杂,所以可通过多维度变化率综合判断,提升故障判断的快速性,并降低系统误故障判断率。故障电流控制器综合比对限流电感 L_1 的电压变化率和电容 C_1 的电流变化率,据此设置故障线路判断阈值:

$$\begin{cases} \left| \frac{du_{L_1}}{dt} \right| > \left| \frac{du_{ref}}{dt} \right| \\ \left| \frac{di_{C_1}}{dt} \right| > \left| \frac{di_{ref}}{dt} \right| \end{cases} \quad (1)$$

式中: du_{ref}/dt 和 di_{ref}/dt 分别为电感 L_1 的电压变化率和电容 C_1 的电流变化率的判断阈值。

系统采用真双极结构,完整系统结构如图4所示。根据系统结构,可以分为单极故障和双极故障,单极故障如图2(b)所示,正极对地短路,或者负极对地短路,也可能出现正负极之间短路的情况。

在真双极系统中,故障可能出现在正极、负极或者正负极之间,因此需进行故障类型判断,判定故障是极间短路故障还是单极对地故障。

发生极间短路故障后,直流侧故障电流同时流经正极和负极线路,因此正极和负极线路上的限流电感的电压变化率基本相等,电容电流的变化率同

样基本相等。而单极接地故障的正负极线路限流电感电压变化率差别较大,可将此特征作为故障类型判断依据,当满足式(2)条件时,为双极故障。

$$\begin{cases} \left| \frac{du_{L_{1+}}}{dt} - \frac{du_{L_{1-}}}{dt} \right| < \left| \frac{du_{ref1}}{dt} \right| \\ \left| \frac{di_{C_{1+}}}{dt} - \frac{di_{C_{1-}}}{dt} \right| < \left| \frac{di_{ref1}}{dt} \right| \end{cases} \quad (2)$$

当满足式(3)条件时,为单极故障。

$$\begin{cases} \left| \frac{du_{L_{1+}}}{dt} - \frac{du_{L_{1-}}}{dt} \right| \geq \left| \frac{du_{ref1}}{dt} \right| \\ \left| \frac{di_{C_{1+}}}{dt} - \frac{di_{C_{1-}}}{dt} \right| \geq \left| \frac{di_{ref1}}{dt} \right| \end{cases} \quad (3)$$

进行故障类型判断时,首先判断故障是单极故障还是极间故障。限流电感的电压变化率和限流电容电流变化率作差,并将该差值取绝对值后进行判断。当绝对值差值高于设定故障类型判断阈值时,说明正极和负极限流器件变化率差异较大,因此判定此时为单极接地故障。反之,绝对值差值低于设定故障类型判断阈值时,说明正负极限流器件电压电流变化率几乎一致,因此正极和负极线路均在故障回路中,此时判定为极间短路故障。

当故障类型判断结果为极间短路故障后,此时正负极同时发生故障,需要故障电流控制器的正负极同时动作,故不需要再单独判定故障极。若故障类型判断结果为单极接地故障,则还需要进一步明确故障定位,是正极故障还是负极故障。正极故障极识别判据如下:

$$\begin{cases} \left| \frac{du_{L_{1+}}}{dt} - \frac{du_{L_{1-}}}{dt} \right| > \frac{du_{ref2}}{dt} \\ \left| \frac{di_{C_{1+}}}{dt} - \frac{di_{C_{1-}}}{dt} \right| > \frac{di_{ref2}}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

负极故障极识别判据如下:

$$\begin{cases} \left| \frac{du_{L_{1+}}}{dt} - \frac{du_{L_{1-}}}{dt} \right| < -\frac{du_{ref2}}{dt} \\ \left| \frac{di_{C_{1+}}}{dt} - \frac{di_{C_{1-}}}{dt} \right| < -\frac{di_{ref2}}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

在进行正负极故障判断时,可直接利用正极和负极限流电感电压变化率和限流电容电流变化率的差值,无需再进行绝对值处理。如果该差值高于设定故障极识别阈值,则正极线路限流电感电压变化率大于负极线路限流电感电压变化率,正极线路限流电容电流变化率大于负极线路电容电流变化率,即正极线路所在回路的阻抗较小,正极线路发生故障。若该差值低于故障极识别阈值,并为负

值,即负极线路所在回路的阻抗较小,负极线路发生故障。根据上述阈值判断,可识别单极故障、双极故障,并可明确故障发生位置。

低阻故障判断的阈值设定,此时将式(1)中的 u_{ref} 和 i_{ref} 调整为 u_{refp} 和 i_{refp} , 需要考虑线路阻抗,故障放电回路的阻抗越大,限流电感上电流的变化越小,所引起的电压变化率越小。计算线路上限流电感的最小电压变化率,需要将线路中的最大阻抗参数带入计算。因此,根据图 3(a) 中等效电路,将直流故障线路全线路长度对应的阻抗带入求解,得到直流故障发生后,限流电感电压变化率的最小值 u_{refp} 和限流电容电流变化率的最小值 i_{refp} 。为了保证故障类型判断的准确性,设定故障线路判断阈值高于限流电容电流变化率的最小值和限流电感电压变化率的最小值。考虑一定裕度情况下,引入故障裕度调节参数,一次故障线路判断阈值的设计可调整为:

$$\begin{cases} \frac{du_{ref}}{dt} = \frac{du_{refp}}{dt} k_{ref} \\ \frac{di_{ref}}{dt} = \frac{di_{refp}}{dt} k_{ref} \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_{ref} 为故障裕度调节参数。

当 k_{ref} 取值较大时,故障时限流电感电压变化率和限流电容的电流变化率需更长时间超过阈值,从而完成故障判断。但同时非故障线路上限流电感电压变化率和限流电容的电流变化率却不容易超过故障线路判断阈值,误报概率降低;当 k_{ref} 取值较小时,限流电感电压变化率和限流电容的电流变化率能够在较短时间内超过阈值,完成故障类型判断。但故障裕度调节参数取值过低,非故障线路上限流电感电压变化率或限流电容电流变化率出现波动时,容易超过该阈值,误报概率增加。综合考虑故障类型判断的正确性和快速性, k_{ref} 可取值范围为 95%~105%。

上述故障判断时考虑低阻故障。当发生高阻故障时,故障后各换流站直流线路限流电感电压变化率比低阻故障时小很多,因此需要对高阻故障提出直流故障的后备检测方案,实现对低阻故障和高阻故障的多类型故障综合判断。

高阻故障判断主要容易和负荷突变发生混淆,主要判断依据在于限流电感的电压变化率和限流电容的电流变化率,所以只要保证故障的阈值大于满负荷突投引起的电压电流变化率即可实现对高阻故障的判断。通过计算可得出负荷从零到满额突投时限流电感的电压变化率 u_{refe} 和限流电容的电

流变化率 i_{refe} , 定义高阻电压变化率阈值 u_{ref3} 和电容电流变化率阈值 i_{ref3} , 得出两者关系:

$$\begin{cases} \frac{du_{\text{ref3}}}{dt} = \frac{du_{\text{refe}}}{dt} k_{\text{refe}} \\ \frac{di_{\text{ref3}}}{dt} = \frac{di_{\text{refe}}}{dt} k_{\text{refe}} \end{cases} \quad (7)$$

k_{refe} 取值应大于 1, 取值越大, 非故障极被误判为故障极的几率越低, 但也将降低故障极识别速度。 k_{refe} 取值要远低于阻故障阈值, 为了将二者进行有效区分, 对于高阻故障加入线路电流幅值判定, 即必须同时满足式(7)的变化率阈值, 且满足线路电流:

$$i_{L_1} > i_{\text{ref4}} \quad (8)$$

式中: i_{ref4} 为线路额定负载电流。

当系统同时满足式(7)和式(8), 才可判断为高阻故障, 避免和负荷突投相冲突; 当系统满足式(1)一个条件时, 即可以判定低阻故障, 实现对低阻故障判断的快速性和高阻故障判断的准确性。

2.2 限流和阻断模式判断

限流模式的目的是为了降低故障电流的上升率, 但并不能有效完整抑制故障电流, 因此需进入到故障阻断模式, 才能进行故障抑制。在此定义限流模式为投入可控电压的直流母线电容, 该过程是将故障电流限制在一定水平, 即使低阻故障, 线路也不会出现较大幅值的电流。目的在于:

(1) 如线路中故障时间很短, 即出现瞬时性故障, 故障电流控制器可保证线路的快速重合闸, 恢复额定供电;

(2) 当故障出现在馈线位置时, 故障电流控制器并不会直接将母线切断, 将故障电流限制在一定水平范围内等待主控指令, 如接受指令为馈线位置, 则继续维持电流在区间范围, 等待馈线开关切断后, 故障电流控制器恢复母线额定供电;

(3) 当故障出现在母线出口位置时, 故障电流控制器接受系统调度, 进入完全阻断模式, 保证线路供电安全性。

故障判断的时序根据式(1)一式(6)进行故障类别判断, 识别单极/双极故障, 正极/负极故障。当故障判断逻辑从限流模式进入到阻断模式后, 系统需重新加入判定依据来确定此故障是否可自恢复。当限流器件投入后, 线路电流开始下降, 此时设定电流下降阈值, 当电流下降到该阈值后, 系统可恢复到旁路状态。因为对于故障判断时间的约束主要在于最初的旁路状态到限流器件投入, 故电流下降仅通过幅值判定即可。在此状态后, 需设定

限流状态时间, 而限流时间设定的依据选定为式(7)高阻故障阈值。低于此阈值时, 系统恢复至额定负荷; 高于此阈值时, 线路故障依然存在, 需要完全切除故障, 系统完全进入到阻断模式。

3 仿真实验

为验证文中故障电流控制限流阻断功能, 搭建直流配电系统仿真平台, 系统方案如图 4 所示, 系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

参数	数值
直流线路电压/V	750
额定功率/kW	500
中间直流电容电压/V	800
开关频率/kHz	2.5

图 6 为电压跌落时仿真波形, 结合图 4 系统结构所示线路电压和负载电压, 负载额定电压保持目标为 750 V, 而线路电压为 820 V。0.1 s 之前负载电压和线路电压相等; 0.1 s 之后加入电压补偿控制, 使得负载电压保持 750 V 额定, 验证故障电流控制器具备电压调节能力。

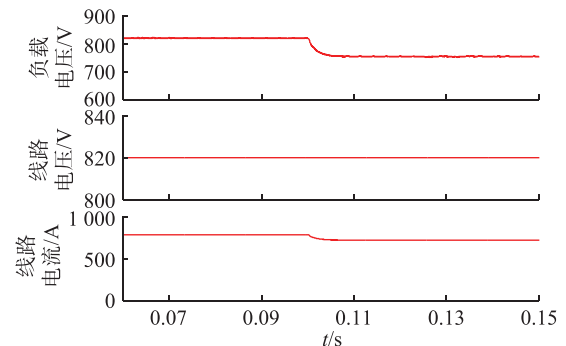


图 6 电压跌落补偿仿真波形

Fig.6 Simulation waveforms of voltage sag compensation

图 7 为高阻短路故障电流阻断波形。故障发生之前, 线路额定电流为 700 A。0.499 s 时刻发生线路金属短路故障, 根据式(1)的故障阈值进行判断。

由图 7 可知, 系统发生短路故障后, 0.500 s 时封锁全部脉冲, 即 1 ms 可实现故障检测, 检测速度可适用于直流配电线路。检测到故障后, 由于直流母线的投入, 线路电流在 0.500 s 时刻完全下降。0.499 s 到 0.500 s 之间的线路电流振荡由 $L_1 C_1$ 振荡引起, 同时能量完全转移到中间直流电容, 直流电压由 800 V 升到 900 V, 电压升幅取决于中间电容容值。

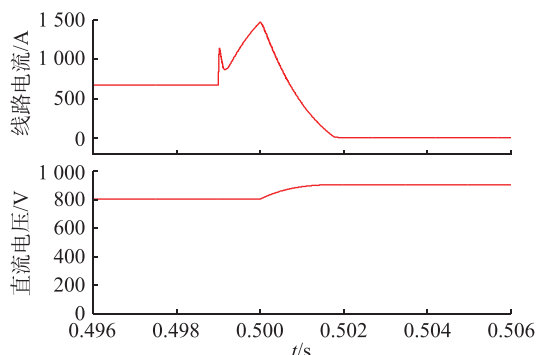


图7 高阻短路故障电流阻断波形

Fig.7 High resistance short circuit fault current blocking waveforms

为了验证高阻短路故障和负载突投的判断识别,图8给出了负载突投仿真波形。0.499 s时刻投入额定负载,同样由于 $L_1 C_1$ 存在线路电流开始有一个谐振峰,之后电流恢复至额定,由于电流幅值 and 变化率的限制,使得故障电流控制器可明确区分负载突投和短路故障。

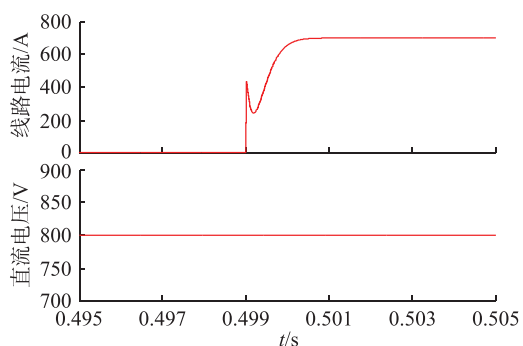


图8 突投额定负载波形

Fig.8 Rated load waveforms of sudden switching

在实际直流配电系统中,可能存在永久性故障或瞬时性故障,在发生瞬时性故障时,故障电流控制器可快速恢复故障,将故障时刻的电流进行限制。图9为瞬时性金属短路故障波形,0.499 s故障发生后,故障电流快速上升;0.500 s封锁脉冲后,电流开始下降;0.505 s时刻闭合S3和S4,此时故障已经消失,电流恢复至额定,实现瞬时性故障穿越。

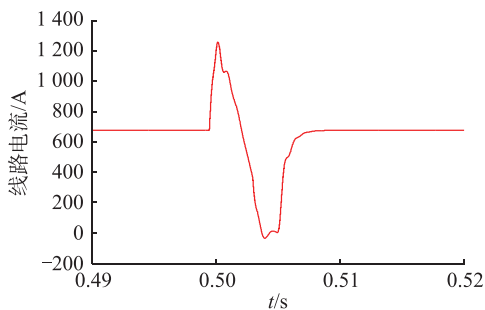


图9 瞬时故障穿越波形

Fig.9 Transient fault ride through waveform

图10为永久性金属短路故障波形。0.499 s故障发生后,故障电流快速上升;0.500 s封锁脉冲后,电流开始下降;0.504 s时刻再次闭合S3和S4,此时由于故障依然存在,故障电流快速上升,根据限流器件电流变化率和电压变化率阈值判断,认定此时依然存在短路故障;0.505 s再次封锁脉冲,故障电流下降到零,通过2次判断实现永久性故障阻断。

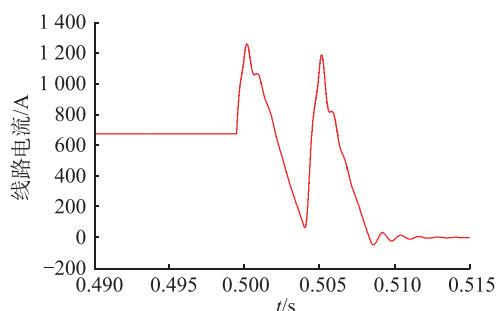


图10 永久性故障穿越波形

Fig.10 Permanent fault ride through waveform

4 结语

针对直流电网中存在短路电流快速上升,末端电压波形等问题,文中提出了一种基于LCL型多功能故障电流控制器拓扑结构,通过对LCL滤波器的功能复用,使其同时具备故障限流、故障阻断和电压调节等功能,减少了直流系统的设备数量。

在LCL多功能故障电流控制器拓扑结构基础上,提出了故障电流快速检测方法,通过对限流器件电压变化率和电流变化率的综合判断,实现低阻故障、高阻故障和负载突投等多种情况的快速识别,并可以实现线路瞬时性故障穿越和永久性故障阻断。最后通过搭建仿真系统验证故障电流控制器拓扑结构及其故障快速检测方法的有效性。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“交直流系统PET与FCL协调控制技术研究”(J2-019134)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 张宸宇,袁宇波,袁晓冬,等. 电力电子变压器直流端口传感器位置选取方法[J]. 电力工程技术,2020,39(4):22-27.
ZHANG Chenyu, YUAN Yubo, YUAN Xiaodong, et al. Selection of DC port sensor position for power electronic transformer[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 22-27.

[2] 年珩,孔亮. 环网式直流微网短路故障下断路器与限流器优化配置方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6861-6872,7120.
NIAN Heng, KONG Liang. An optimization placement method for circuit breakers and fault current limiters of looped-type DC micro-grids for short circuit faults [J]. Proceedings of the

- CSEE, 2018, 38(23):6861-6872, 7120.
- [3] 韩乃峥, 贾秀芳, 赵西贝, 等. 一种新型混合式直流故障限流器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6):1647-1658, 1861.
HAN Naizheng, JIA Xiufang, ZHAO Xibei, et al. A novel hybrid DC fault current limiter topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6):1647-1658, 1861.
- [4] 汪洋, 陈凤云, 肖文, 等. 考虑不确定性和含换电站的直流微电网优化研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(7):46-51.
WANG Yang, CHEN Fengyun, XIAO Wen, et al. Optimization of DC microgrid considering uncertainty and battery swap station[J]. Smart Power, 2020, 48(7):46-51.
- [5] 薛士敏, 黄仁乐, 高峰, 等. 基于暂态电流突变量的直流配电系统快速纵联保护新原理[J]. 供用电, 2016, 33(8):37-44.
XUE Shimin, HUANG Renle, GAO Feng, et al. High-speed pilot protection principle for DC distribution system based on the difference of transient currents[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(8):37-44.
- [6] 余修勇, 肖立业, 林良真, 等. 基于单端量的柔性直流电网故障识别方案[J]. 高电压技术, 2018, 44(2):440-447.
YU Xiuyong, XIAO Liye, LIN Liangzhen, et al. Single-ended fast fault detection scheme for MMC-based HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2):440-447.
- [7] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波, 等. 环状柔直配电网线路的单端量保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23):6825-6836, 7117.
DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo, et al. Single-terminal quantity based line protection for ring flexible DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23):6825-6836, 7117.
- [8] YEAP Y M, GEDDADA N, SATPATHI K, et al. Time-and frequency-domain fault detection in a VSC-interfaced experimental DC test system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(10):4353-4364.
- [9] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21):5741-5749, 6016.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21):5741-5749, 6016.
- [10] 何佳伟, 李斌, 李晔, 等. 多端柔性直流电网快速方向纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23):6878-6887, 7078.
HE Jiawei, LI Bin, LI Ye, et al. A fast directional pilot protection scheme for the MMC-based MTDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23):6878-6887, 7078.
- [11] 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 pro-
- cessing technology for DC distribution network based on fault blocking converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5):101-113.
- [12] FENG X Y, QI L, PAN J P. A novel fault location method and algorithm for DC distribution protection[C]//2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Portland, OR, USA. IEEE, 2016:1-5.
- [13] DHAR S, PATNAIK R K, DASH P K. Fault detection and location of photovoltaic based DC microgrid using differential protection strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5):4303-4312.
- [14] LUO G M, TAN Y J, YAO C Y, et al. Deep learning-based fault location of DC distribution networks[J]. The Journal of Engineering, 2019(16):3301-3305.
- [15] 何荣凯, 朱晋, 霍群海, 等. 新型直流电网潮流控制器及其控制方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4):131-135, 169.
HE Rongkai, ZHU Jin, HUO Qunhai, et al. Novel power flow controller for DC grid and its control method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4):131-135, 169.
- [16] 陆静, 陈曦, 吴熙, 等. 含线间潮流控制器的电力系统联合潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4):22-29.
LU Jing, CHEN Xi, WU Xi, et al. Joint power flow calculation of power system with interline power flow controller[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4):22-29.
- [17] 李国庆, 王浩翔, 王振浩, 等. 含直流潮流控制器的交直流混合系统多目标最优潮流研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15):124-132.
LI Guoqing, WANG Haoxiang, WANG Zhenhao, et al. Study of multi-objective optimal power flow of AC-DC hybrid system with DC power flow controller[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15):124-132.
- [18] LIU W J, LIU F, ZHA X M, et al. An improved SSCB combining fault interruption and fault location functions for DC line short-circuit fault protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3):858-868.
- [19] 尹靖元, 武文, 吴理心, 等. 串并联多功能复合控制器拓扑结构研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2):562-569.
YIN Jingyuan, WU Wen, WU Lixin, et al. Topology research of series-parallel multi-function composite controller[J]. Power System Technology, 2019, 43(2):562-569.

作者简介:



袁晓冬

袁晓冬(1978),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电能质量分析、新能源发电、主动配电网相关工作(E-mail: lannyuan@hotmail.com);

史明明(1987),男,博士,高级工程师,从事电能质量分析,电力电子控制技术相关工作;

杨景刚(1984),男,硕士,高级工程师,从事开关类设备运维检修和状态评价相关工作。

Fault detection method based on LCL fault current controller

YUAN Xiaodong¹, SHI Mingming¹, YANG Jingtang¹, GE Xuefeng¹, YIN Jingyuan²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100180, China)

Abstract: Compared with AC distribution network, many problems should be solved in DC distribution network, such as fault current limiting, fault current blocking and power quality control. In order to reduce the number of equipment in DC system, a multi-functional fault current controller topology based on LCL structure is proposed, which has the capacity for fault current limiting, fault current blocking and voltage regulation. On account of the topology structure, the operation principle of LCL structure under different working objectives is studied, and the multiplexing process of filtering and limiting current of LCL structure is clarified. A fast detection method of fault current is also proposed. By matching the threshold value of voltage change rate and current change rate at different positions of current limiting device, the fast judgment of bipolar fault, single pole fault and high resistance fault are realized. Finally, the system simulation model is built to verify the validity of multi-functional of the fault current controller topology, and the rapidity of fault current detection.

Keywords: DC grid; fault current controller; LCL structure; fault current limiting; fault detection

(编辑 李栋)

(上接第 66 页)

Insulation dielectric properties of retired high voltage cables at different temperatures

FAN Xinghui¹, XIE Yue¹, LIU Gang¹, ZHAO Yifeng¹, ZHU Wenwei², ZHANG Juntao¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Grid Planning & Research Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510075, China)

Abstract: Based on two retired cross-linked polyethylene (XLPE) cables with different service years and a spare cable, the changes in dielectric properties of XLPE from different positions of cable insulation are studied. The XLPE samples are sliced from the cables, and the dielectric spectra are measured at eight temperature points located between 50 °C and 250 °C, respectively. The results show that the spectra of complex dielectric constant for XLPE at super-high temperature exhibits regular change with frequency. Then, the electrical conductivity and peak frequency of the relaxation peak decrease firstly and inversely increase with the cable service year, which can be good index to show the changes in dielectric properties of cables. The difference in the activation energy corresponding to the peak frequency of the relaxation peak and the central angle corresponding to the Cole-Cole plots at different insulation positions of the same cable decrease firstly and inversely increase with the cable service year, which can well reveal the difference in dielectric properties of the different positions from the same cable. The variation in dielectric property of each sample at super-high temperature with its service year can be used as an effective method to evaluate the insulation status of XLPE cable.

Keywords: 110 kV cross-linked polyethylene cable; super-high temperature; dielectric spectra; complex dielectric modulus; Cole-Cole curve

(编辑 陆海霞)