



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111969552 B

(45) 授权公告日 2022. 08. 30

(21) 申请号 202010729599.8

G01R 31/08 (2006.01)

(22) 申请日 2020.07.27

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 111969552 A

CN 107359588 A, 2017.11.17

CN 108988303 A, 2018.12.11

CN 110739668 A, 2020.01.31

KR 20170023638 A, 2017.03.06

(43) 申请公布日 2020.11.20

(73) 专利权人 天津大学
地址 300072 天津市南开区卫津路92号

审查员 杨长庆

(72) 发明人 李斌 毛琦扬 何佳伟 李晔
孙强

(74) 专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代
理事务所 12201

专利代理师 李素兰

(51) Int. Cl.

H02H 3/06 (2006.01)

H02H 7/26 (2006.01)

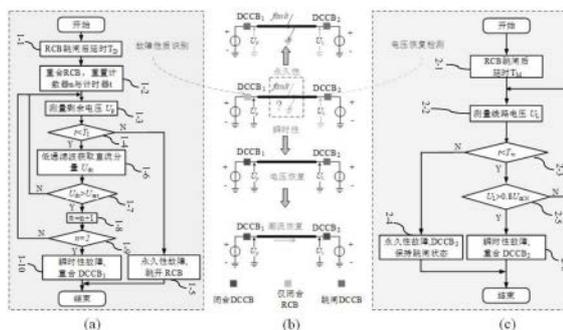
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

一种适用于直流断路器重合闸方法

(57) 摘要

本发明公开了一种适用于直流断路器新型重合闸方法,该方法所基于的多端真双极直流输电系统中每一端均包括直流电网的架空线Line、装设在架空线路两端的机械式直流断路器DCCB₁、DCCB₂,跳闸线路两侧只需其中一端DCCB₁或DCCB₂来实现依据故障性质判断结果的重合闸策略;该方法的实现流程包括故障性质识别阶段和线路电压恢复检测阶段。与现有技术相比,本发明准确识别永久性故障与瞬时性故障,而且在判别过程中仅重合了直流断路器的剩余电流开关(RCB),换流站与故障线路通过断路器的换流支路和吸能支路连接,避免了重合于永久性故障时的过流冲击,保证了直流系统的安全。



1. 一种适用于直流断路器重合闸方法,其特征在于,该方法所基于的多端真双极直流输电系统,每一端均包括直流电网的架空线Line、装设在架空线线路两端的机械式直流断路器DCCB₁、DCCB₂,跳闸线路两侧只需其中一端DCCB₁ 或DCCB₂来实现依据故障性质判断结果的重合闸策略;该方法的实现流程包括故障性质识别阶段和线路电压恢复检测阶段,具体流程为:

所述故障性质识别阶段的具体实现流程如下:

步骤1-1、剩余电流开关RCB跳闸后进入延时 T_D ,等待线路去游离,以确保故障线路恢复绝缘特性, T_D 的选取范围在200-500ms;

步骤1-2、重合剩余电流开关RCB,重置计数器 n 与计时器 t ;

步骤1-3、测量残余电压 U_p ;

步骤1-4、判断是否 $t < T_I$,其中, T_I 为故障性质判别时窗;

步骤1-5、滤波后的直流分量 U_{dc} 不满足步骤1-4的条件,则判定为永久性故障,重新跳开剩余电流开关RCB;

步骤1-6、通过低通滤波算法获取直流分量 U_{dc} ;

步骤1-7、判断是否满足 $U_{dc} > U_{set}$,阈值 U_{set} 的设定原则为:

$$\begin{cases} U_{set} = \frac{1}{K_{relv}} \cdot U_p \\ U_p = \frac{1 + G_L R_L}{1 + 2G_L R_A + G_L R_L + G_L^2 R_L R_A} \cdot U_{dcp} \end{cases}$$

其中, U_p 为瞬时性故障残余稳态电压计算值, K_{relv} 为阈值电压设定的可靠系数,取值范围在4~6, R_L 、 G_L 为架空线路的等效电阻和等效电导, R_A 为直流断路器吸能支路等效电阻, U_{dcp} 表示直流系统一极的电源电压;

步骤1-8、如满足 $U_{dc} > U_{set}$,则令计数器 $n=n+1$;

接着,步骤1-9、判断计数器 $n=2$ 是否成立,即判断是否满足连续测定满足条件;

步骤1-10、如满足计数器 $n=2$,则判定为瞬时性故障,重合DCCB₁,

如未满足 $U_{dc} > U_{set}$,或者,未满足计数器 $n=2$,则返回步骤1-3;

所述线路电压恢复检测阶段的具体实现流程如下:

步骤2-1、RCB跳闸后进入延时 T_M ;

步骤2-2、测量直流线路电压 U_L ;

步骤2-3、判断当前是否满足 $t < T_W$, T_W 为检测电压恢复时窗;

步骤2-4、如未满足,则判断为永久性故障,DCCB₂保持跳闸状态;

步骤2-5、如满足,判断是否满足 $U_L > 0.8U_{dcN}$, U_{dcN} 表示直流系统额定电压;

步骤2-6、如满足 $U_L > 0.8U_{dcN}$,判定当前为瞬时性故障,重合DCCB₂;若不满足 $U_L > 0.8U_{dcN}$,返回步骤2-2,重新测量直流线路电压 U_L 。

2. 如权利要求1所述的一种适用于直流断路器重合闸方法,其特征在于,通滤波器的截止频率选取选择为:

$$f_c = \frac{1}{K_{\text{rel},f}} \cdot \min\{\beta_1, \beta_2\}$$

其中,滤波器截止频率选择的可靠系数 $K_{\text{rel},f}$ 取值范围为5~10, β_1 、 β_2 由永久性故障下,暂态过程的复频域 $U_p(s)$ 确定,计算公式为:

$$U_p(s) = \frac{C_q(R_L + sL_L)U_{dq}}{s^4 L_q C_q L_L C_L + s^3 C_L C_q (R_L L_q + R_q L_L) + s^2 (L_L C_L + L_L C_q + L_q C_q + R_L C_L R_q C_q) + s(R_L C_L + R_L C_q + R_q C_q) + 1} \quad (5)$$

$$= \frac{(R_L + sL_L)U_{dq}}{L_q L_L C_L (s + \alpha_1 - j\beta_1)(s + \alpha_1 + j\beta_1)(s + \alpha_2 - j\beta_2)(s + \alpha_2 + j\beta_2)}$$

$$L_q = L_M + L_F + L, C_q = C_M \cdot C / (C_M + C), R_q = R_M$$

其中, L_M , C_M , R_M 分别表示换流站等效电感、电容、电阻, L_F 表示直流系统中限流电抗器, L , C 分别表示直流断路器换流支路中的电感、电容, L_L , C_L , R_L 分别表示直流架空线路的等效电感、电容、电阻。

一种适用于直流断路器重合闸方法

技术领域

[0001] 本发明涉及直流输电系统继电保护领域,具体涉及一种基于机械式直流断路器的重合闸策略。

背景技术

[0002] 随着直流保护与直流断路器技术的快速发展,多端互联的柔性直流电网大范围工程推广应用得以实施。相比于直流电缆,以架空线路实现电能传输具有更大的经济优势。然而,由于架空线路裸露在空气中,无绝缘外壳,极易受自然环境影响,发生故障的概率较高,且多为瞬时性故障。针对这一现状,有必要设计一种适用于机械式直流断路器的新型重合闸策略,以实现故障性质的可靠判断,并且确保永久性故障情况下不会对系统造成二次冲击,确保在瞬时性故障情况下被切除线路的快速供电恢复。架空线路中的短路故障大多数为瞬时性故障,有效的重合闸策略能够大大缩短停电时间,提高系统供电可靠性。传统交流输电系统自动重合闸直接应用于柔性直流电网会导致严重的二次冲击。而目前针对直流电网的重合闸策略主要以混合式直流断路器为研究背景,适用于机械式直流断路器的自适应重合闸策略研究尚处于空白阶段。

[0003] 与交流系统的高压断路器不同,应用于柔性直流电网的直流断路器具有更为复杂的故障电流开断原理与电路拓扑结构,因此其重合闸过程更为复杂;而且直流电网中应用了大量基于电力电子器件的设备,对重合闸期间的二次过流耐受能力也远远弱于交流同步机设备。直流电网中直流断路器重合闸策略的设计与具体的直流断路器类型高度相关,文献“Sequential auto-reclosing method for hybrid HVDC breaker in VSC HVDC links”提出了一种顺序自动重合闸策略,采用顺序重合主断路器模块的方法限制重合于永久性故障时的过电流,并通过故障检测算法来确定故障是否消失。文献“DC Line Fault Identification Based on Pulse Injection From Hybrid HVDC Breaker”通过主断路器中固态设备的开关控制,实现了向直流故障线路注入电压脉冲。并提出基于行波的故障定位算法识别故障性质的方法。然而,上述研究均利用了混合式直流断路器的拓扑结构特点,对于配备机械式直流断路器的直流电网并不适用。

[0004] 对于多端直流输电系统,在架空线路两侧装设直流断路器以确保发生故障时有选择性切除故障线路。目前适用于高压直流电网的直流断路器包括混合式直流断路器与机械式直流断路器。相对于混合式高压直流断路器,机械式高压直流断路器具有可靠性高、损耗小、成本低、占地面积小且可直接户外布置等优势。因此机械式直流断路器在高压直流电网中具有很好的应用前景。机械式直流断路器的拓扑结构可以划分为三个部分,分别是(1)由快速真空开关构成的通流支路;(2)由预充电电容、电感元件以及触发单元构成的转移支路;(3)由避雷器构成的吸能支路。除此之外,断路器一侧还接有用于断开剩余电流的剩余电流开关。

[0005] 如何实现适用于机械式直流断路器的自适应重合闸策略是本发明亟待解决的技术问题。

发明内容

[0006] 针对以架空线路作为电能传输媒介、并配备机械式直流断路器的多端直流系统，本发明提出了一种适用于直流断路器重合闸方法，能够准确识别故障性质、并且不会对直流系统产生二次过流冲击的自适应重合闸策略。

[0007] 本发明的一种适用于直流断路器重合闸方法，所基于的多端真双极直流输电系统，每一端均包括直流电网的架空线Line、装设在架空线路两端的机械式直流断路器DCCB₁、DCCB₂，跳闸线路两侧只需其中一端DCCB₁或DCCB₂来实现依据故障性质判断结果的重合闸策略；该方法的实现流程包括故障性质识别阶段和线路电压恢复检测阶段，具体流程为：

[0008] 所述故障性质识别阶段的具体实现流程如下：

[0009] 步骤1-1、剩余电流开关RCB跳闸后进入延时T_D，等待线路去游离，以确保故障线路恢复绝缘特性，T_D的选取范围通常在200-500ms；

[0010] 步骤1-2、重合剩余电流开关RCB，重置计数器n与计时器t；

[0011] 步骤1-3、测量残余电压U_p；

[0012] 步骤1-4、判断是否t<T_I?，其中，T_I为故障性质判别时窗；

[0013] 步骤1-5、滤波后的直流分量U_{dc}不满足步骤1-4的条件，则判定为永久性故障，重新跳开剩余电流开关RCB；

[0014] 步骤1-6、通过低通滤波算法获取直流分量U_{dc}；

[0015] 步骤1-7、判断是否满足U_{dc}>U_{set}?U_{set}的设定原则为：

$$[0016] \quad \begin{cases} U_{set} = \frac{1}{K_{relU}} \cdot U_p \\ U_p = \frac{1 + G_L R_L}{1 + 2G_L R_A + G_L R_L + G_L^2 R_L R_A} \cdot U_{dcp} \end{cases}$$

[0017] 其中，U_p为瞬时性故障残余稳态电压计算值，K_{relU}为门槛电压设定的可靠系数，取值范围在4~6；

[0018] 步骤1-8、如满足U_{dc}>U_{set}，则令计数器n=n+1；

[0019] 接着，步骤1-9、判断计数器n=2是否成立，即判断是否满足连续测定满足条件？

[0020] 步骤1-10、如满足计数器n=2，则判定为瞬时性故障，重合DCCB₁，

[0021] 如未满足U_{dc}>U_{set}，或者，未满足计数器n=2，则返回步骤1-3；

[0022] 所述线路电压恢复检测阶段的具体实现流程如下：

[0023] 步骤2-1、RCB跳闸后进入延时T_M；

[0024] 步骤2-2、测量直流线路电压U_L；

[0025] 步骤2-3、判断当前是否满足t<T_w?T_w为检测电压恢复时窗；

[0026] 步骤2-4、如未满足，则判断为永久性故障，DCCB₂保持跳闸状态；

[0027] 步骤2-5、如满足，再进一步判断是否满足U_L>0.8U_{dcN}，U_{dcN}表示直流系统额定电压；

[0028] 步骤2-6、如满足U_L>0.8U_{dcN}，判定当前为瞬时性故障，重合DCCB₂；若不满足U_L>0.8U_{dcN}，返回步骤2-2，重新测量直流线路电压U_L。

[0029] 与现有技术相比，本发明可以准确识别永久性故障与瞬时性故障；而且在判别过程中仅重合了直流断路器的剩余电流开关(RCB)，换流站与故障线路通过断路器的换流支

路和吸能支路连接,避免了重合于永久性故障时的过流冲击,保证了直流系统的安全。

附图说明

[0030] 图1为四端直流输电系统及关键设备等效模型示意图;

[0031] 图2为不同故障性质下直流输电系统等效电路示意图;(a)瞬时性故障;(b)永久性故障,

[0032] 图3为一种适用于直流断路器重合闸方法流程示意图,3 (a)故障性质判别流程图,3 (b)重合闸协同配合示意图,3 (c)电压恢复检测流程图。

具体实施方式

[0033] 以下结合附图对本发明的具体实施方式作进一步的详细描述。

[0034] 如图1所示,为四端真双极直流输电系统及关键设备等效模型示意图,该系统中,每一端均包括直流电网的架空线Line、装设在架空线路两端的机械式直流断路器DCCB₁、DCCB₂。当线路发生故障时,设置于故障极线两侧的机械式直流断路器快速动作,切除故障线路;经过200ms~300ms的故障去游离时间以后,通过故障极线两侧的机械式断路器的配合来实现自适应重合闸。以设置于故障极线本侧的机械式断路器DCCB₁先重合闸(故障性质检测),设置于故障极线对侧的机械式断路器DCCB₂后重合闸。(线路电压恢复检测)为例。具体方法如下所述。

[0035] 为创造能够实现故障性质判断的电气量特性,在断路器跳闸以及足够的去游离延时以后,重合直流断路器M的剩余电流开关RCB。重合RCB后,不同故障性质下直流输电系统等效电路示意图如图2所示。

[0036] 如图2中的(a)所示,瞬时性单极接地故障时的残余电压稳态值 U_p 表达式如下:

$$[0037] \quad U_p = \frac{R_L}{R_A + R_L + G_L R_L R_A} \cdot U_{dcp} \quad (1)$$

[0038] 其中, R_L 、 G_L 为架空线路的等效电阻和等效电导, R_A 为直流断路器吸能支路等效电阻(U_{dcp} 表示直流系统一极的电源电压)。

[0039] 如图2中(b)所示,永久性单极接地故障残余电压稳态值 U_p 表达式如下:

$$[0040] \quad U_p = \frac{1 + G_L R_L}{1 + 2G_L R_A + G_L R_L + G_L^2 R_L R_A} \cdot U_{dcp} \quad (2)$$

[0041] 由于架空线路对地电阻与避雷器等效电阻均为数百千欧等级,而架空线路等效电阻为数百欧等级。因此在永久性故障时,稳态残余电压接近于零。而瞬时性故障时残余电压达到数百千伏。

[0042] 根据上述特性差异,即可实现故障性质的判断。

[0043] 如图3(a)所示,为本发明的故障性质识别流程,具体步骤如下:

[0044] 步骤1-1、剩余电流开关RCB跳闸后进入延时 T_p ,等待线路去游离,以确保故障线路恢复绝缘特性, T_p 的选取范围通常在200-500ms;

[0045] 步骤1-2、重合剩余电流开关RCB,重置计数器n与计时器t;

[0046] 步骤1-3、测量残余电压 U_p ,并通过低通滤波算法得到滤波后的直流分量 U_{dc} ;

[0047] 步骤1-4、判断是否 $t < T_1$? (T_1 为故障性质判别时窗)

[0048] 通过比较 U_{dc} 和阈值 U_{set} 来识别故障属性;为提高判别的可靠性,连续数次比较 U_{dc} 和 U_{set} ;如果连续满足 $U_{dc} > U_{set}$,则判定该故障是瞬时性故障且故障点已经消失,直流断路器可完全重合;

[0049] 步骤1-5、若在 $0 \sim T_I$ 时段内,不能够满足步骤3中的条件,则判定为永久性故障,重新跳开剩余电流开关RCB;

[0050] 步骤1-6、若是满足 $t < T_I$,则由低通滤波获取直流分量 U_{dc} ;

[0051] 步骤1-7、判断是否满足 $U_{dc} > U_{set}$?

[0052] 步骤1-8、如满足 $U_{dc} > U_{set}$,

[0053] 步骤1-9、则令计数器 $n = n + 1$;

[0054] 接着,步骤1-10、判断计数器 $n = 2$ 是否成立,即判断是否满足连续测定满足条件?

[0055] 如满足,则判定为瞬时性故障,重合DCCB₁,

[0056] 如未满足 $U_{dc} > U_{set}$,或者,未满足计数器 $n = 2$,则返回步骤3。

[0057] 跳闸线路两侧只需其中一端DCCB(例如DCCB₁)实施上述重合闸策略。故障线路两端断路器的协同配合示意图如图3(b)所示。显然当DCCB₁确定故障为瞬时性故障并重合后,线路电压快速恢复。因此,另一端DCCB(DCCB₂)在跳闸延时 T_M 后(为确保重合的先后顺序, T_M 应大于 T_D),依据直流线路电压是否恢复(例如 $> 0.8U_{dcN}$)来判断是否应该重合。若直流线路电压恢复到 $0.8U_{dcN}$ 以上,则认为对端断路器(DCCB₁)已经判断出故障为瞬时性,并已经重合,因此本端断路器(DCCB₂)也可以重合。

[0058] 如图3(c)所示,为本发明的线路电压恢复检测流程,具体包括以下步骤:

[0059] 步骤2-1、RCB跳闸后进入延时 T_M ;

[0060] 步骤2-2、测量直流线路电压 U_L ;

[0061] 步骤2-3、判断当前是否满足 $t < T_w$? (T_w 为检测电压恢复时窗)

[0062] 步骤2-4、如未满足,则判断为永久性故障,DCCB₂保持跳闸状态;

[0063] 步骤2-5、如满足,再进一步判断是否满足 $U_L > 0.8U_{dcN}$ (U_{dcN} 表示直流系统额定电压)

[0064] 步骤2-6、如满足 $U_L > 0.8U_{dcN}$,判定当前为瞬时性故障,重合DCCB₂;若不满足 $U_L > 0.8U_{dcN}$,返回步骤2-2,重新测量直流线路电压 U_L 。

[0065] 阈值 U_{set} 的设定原则为:

$$[0066] \begin{cases} U_{set} = \frac{1}{K_{relU}} \cdot U_p \\ U_p = \frac{1 + G_L R_L}{1 + 2G_L R_A + G_L R_L + G_L^2 R_L R_A} \cdot U_{dcp} \end{cases} \quad (3)$$

[0067] 其中, U_p 为瞬时性故障残余稳态电压计算值, K_{relU} 为阈值电压设定的可靠系数,取值范围在4~6。

[0068] 低通滤波器的截止频率选取选择为:

$$[0069] f_c = \frac{1}{K_{relf}} \cdot \min\{\beta_1, \beta_2\} \quad (4)$$

[0070] 其中,滤波器截止频率选择的可靠系数 K_{relf} 取值范围为5~10, β_1 、 β_2 由永久性故障下,暂态过程的复频域 $U_p(s)$ 确定,计算公式为:

$$\begin{aligned}
 U_p(s) &= \frac{C_q(R_L + sL_L)U_{dep}}{s^4 L_q C_q L_L C_L + s^3 C_L C_q (R_L L_q + R_q L_L) + s^2 (L_L C_L + L_L C_q + L_q C_q + R_L C_L R_q C_q) + s(R_L C_L + R_L C_q + R_q C_q) + 1} \\
 [0071] \quad &= \frac{(R_L + sL_L)U_{dep}}{L_q L_L C_L (s + \alpha_1 - j\beta_1)(s + \alpha_1 + j\beta_1)(s + \alpha_2 - j\beta_2)(s + \alpha_2 + j\beta_2)}
 \end{aligned}$$

(5)

[0072] $L_q = L_M + L_F + L$, $C_q = C_M \cdot C / (C_M + C)$, $R_q = R_M$

[0073] 其中, L_M, C_M, R_M 分别表示换流站等效电感、电容、电阻, L_F 表示直流系统中限流电抗器, L, C 分别表示直流断路器换流支路中的电感、电容; L_L, C_L, R_L 分别表示直流架空线路的等效电感、电容、电阻。

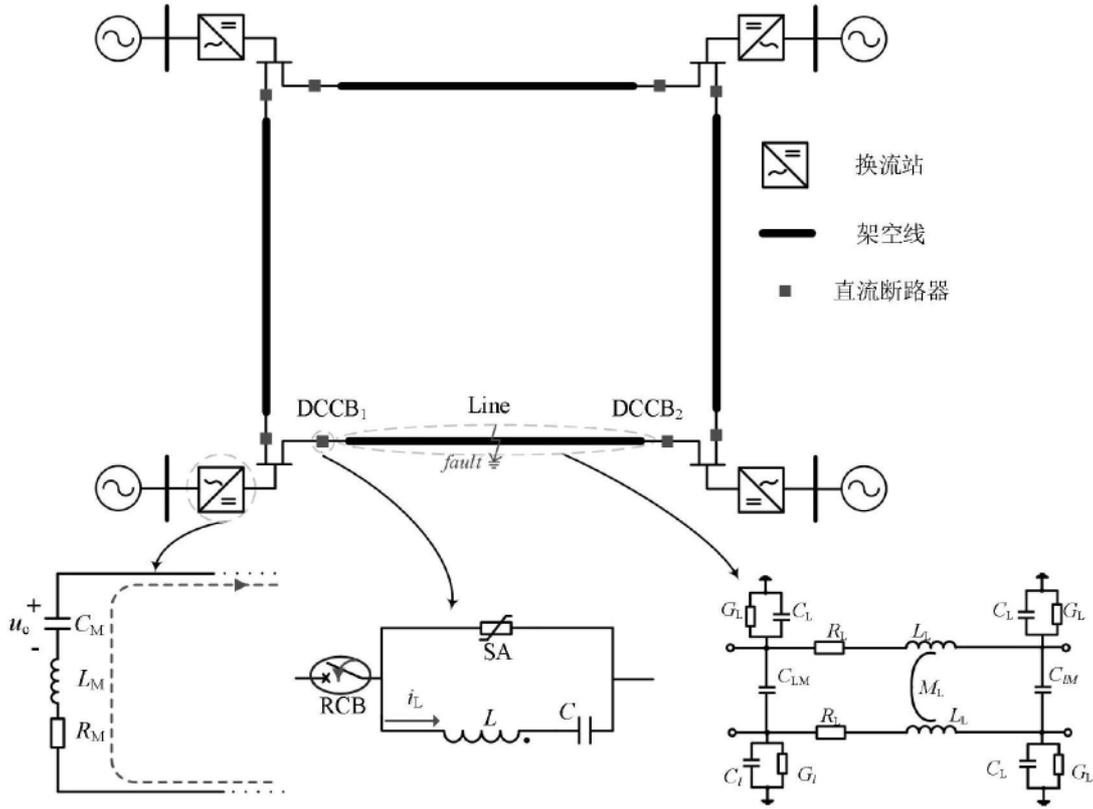


图1

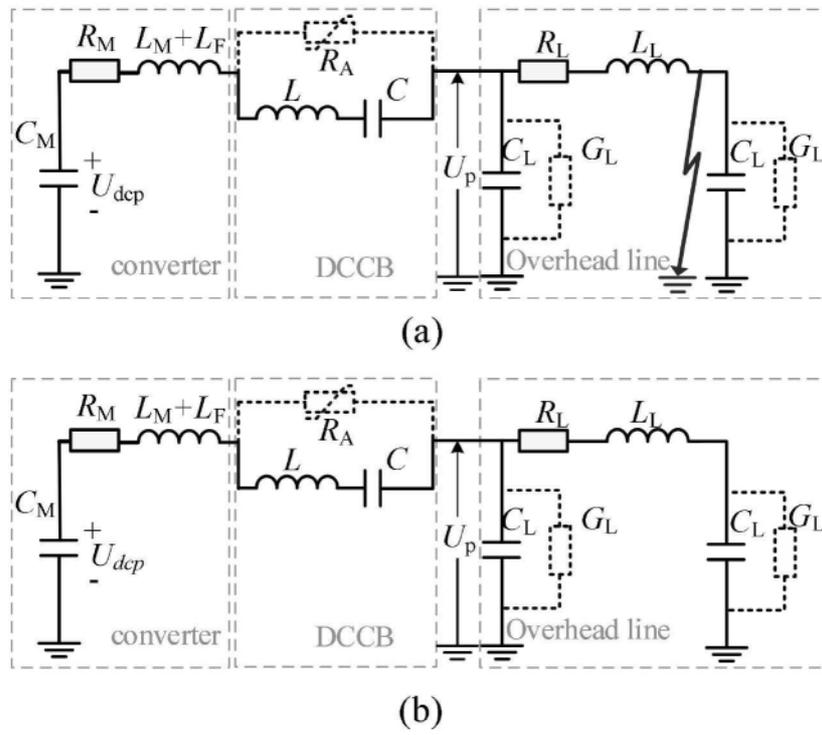


图2

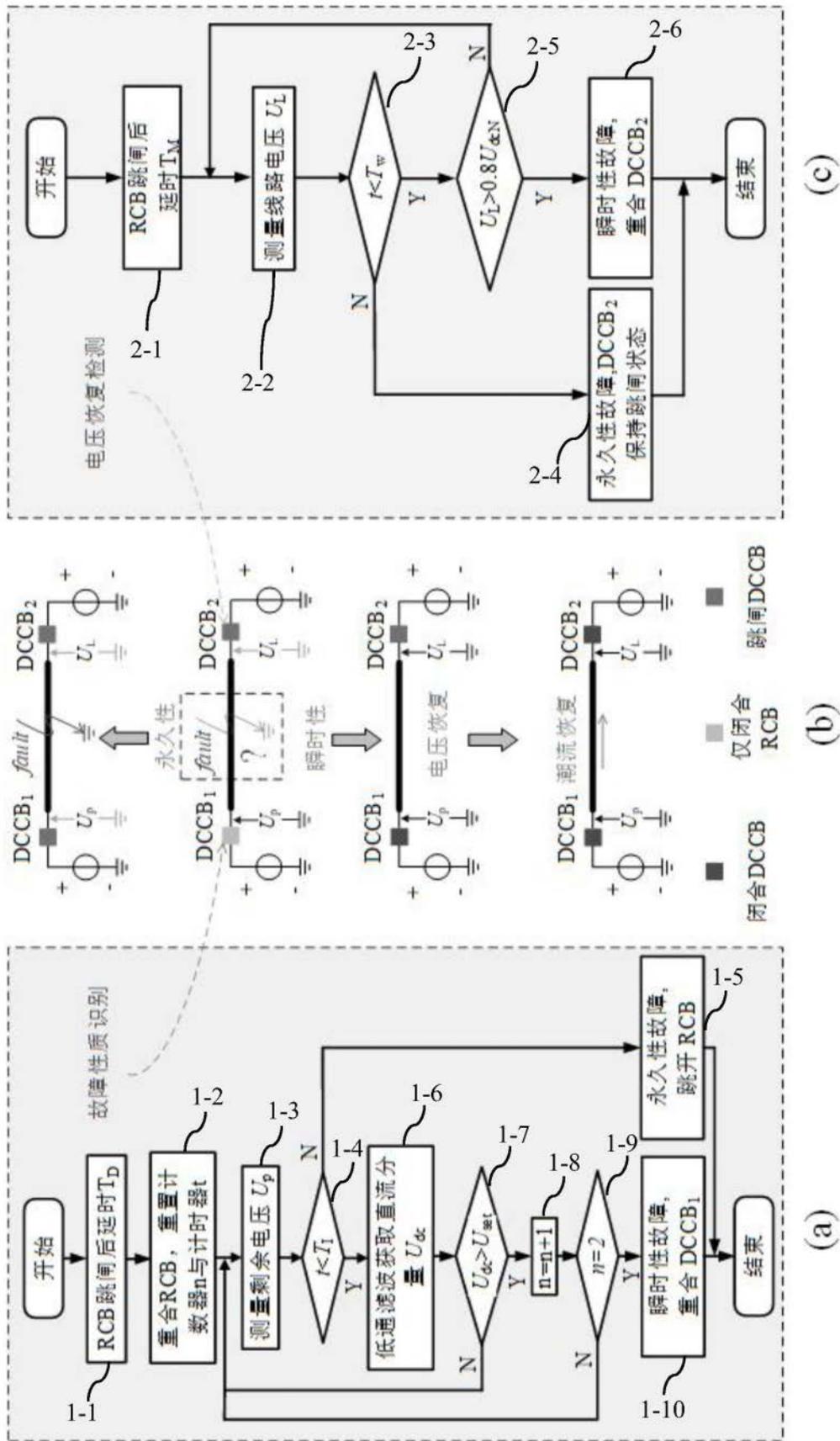


图3