计及主动故障限流策略的柔性直流电网纵联保护

宋国兵¹,侯俊杰¹,郭 冰¹,王 婷¹,常仲学¹,沈 冰² (1. 西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049;2. 国网上海市电力科学研究院,上海 200437)

摘要:针对传统直流保护原理应用于柔性直流电网中存在可靠性降低、灵敏度下降的问题,提出计及换流器 主动故障限流策略的柔性直流电网纵联保护原理。分析了故障电流在换流器电容放电阶段和换流器主动故 障限流阶段的极性特征,进一步构造了改进型故障电流极性特征序列,引入基于斯皮尔曼相关性系数的电流 波形特征判别方法,实现柔性直流电网故障区域判别。仿真结果表明,所提保护原理在换流器的电容放电阶 段和换流器主动故障限流阶段均能识别出柔性直流电网故障区域,具备较高的可靠性和灵敏度。

DOI:10.16081/j.epae.202101024

0 引言

目前柔性直流系统发生故障后,一方面,由于换 流器电力电子器件的脆弱性,故障后换流器大多数 采用闭锁策略,故障后数毫秒内换流器的闭锁限制 了故障信息的有效获取^[1-2],保护原理可靠性降低; 另一方面,现有大多数系统常采用电压源换流器 (VSC)或半桥模块化多电平换流器(MMC)拓扑,换 流器发生闭锁后^[2],由于交流侧续流作用,直流侧短 路电流仍然较大,直流断路器开断受限^[2]。

现有柔性直流输电线路保护还没有完善的方 案,因此现阶段其仅能参考传统高压直流系统,配置 的保护原理主要分为主保护和后备保护^[3-4]。主保 护中的行波保护和微分欠压保护易受到过渡电阻、 噪声、雷击、采样率、直流边界强弱等因素的影响,保 护可靠性降低,保护范围可能存在死区[3]。后备保 护主要以双端量保护为主,考虑到传统差动保护原 理的局限性[34],有学者提出了改进型差动保护原 理,主要包括分布电容补偿的差动保护^[5-6]和行波差 动保护原理[7],前者大多基于集中参数线路模型,不 能完全消除分布电容电流,后者可能存在计算量较 大、可靠性较低等问题。不少学者开展了直流线路 纵联保护新原理的研究[8-18],主要包括利用直流边界 特征的双端量保护^[8-9]、识别系统参数的模型识别纵 联保护^[10]、利用电气量方向特征构成的方向纵联保 护[11-18]。其中,文献[8]根据电抗器两侧的电压幅值 差异构成保护原理,文献[9]根据直流线路与边界在

收稿日期:2019-11-12;修回日期:2020-11-26

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点支持项目 (U1766209);国家电网公司总部科技项目(52170218000M, 52094020006U)

Project supported by the Key Program of Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China(U1766209) and the Science and Technology Project of SGCC Headquarters (52170218000M,52094020006U)

不同频带下呈现的阻抗特征差异构成相应的保护原 理,两者的保护性能与直流边界强度密切相关;文献 [10]针对 VSC 系统,提出识别 VSC 电容模型的纵联 保护新原理,保护性能可能受到频变参数等因素的 影响。考虑基于极性特征的纵联保护原理具有不受 直流边界的影响和易于实现的优势。其中,文献 [11-14]利用直流电流方向(极性)构成纵联保护(依 赖于直流电流绝对值大小和正负判断方向),考虑到 噪声及暂态电流波动的影响,该保护原理的适应性 需进一步研究。为此,部分研究引入了基于相似性 特征的保护判据[15-17],其主要利用故障后故障线路 两侧电流波形的变化趋势、极性特征,通过余弦相似 性、皮尔逊相似性系数构成保护原理。其中,余弦相 似性系数对异常数据的抗干扰能力不佳[19];基于皮 尔逊相似性系数的方法基于中心化数据处理[19]进行 余弦相似性判别,皮尔逊相似性系数的抗干扰能力 强于余弦相似性系数,但仍受数据量纲影响^[20]。

考虑目前基于极性特征的保护原理,具有不受 直流边界影响和易于实现的优势。多数基于极性特 征的保护原理利用故障初瞬间的电气量极性特 征[11-17],但未计及系统控制作用的影响,在原理上投 入时间较短,在柔性直流电网中,从故障发生至换流 器闭锁仅需数毫秒,因此保护需要在数毫秒内判别 故障,考虑到纵联保护由于数据传输延迟等因素需 要一定延时,保护原理的可靠性需要进一步提高。 文献[18]在计及闭锁作用的前提下,讨论了VSC和 半桥型MMC系统故障电流在电容放电阶段和闭锁 阶段的电流特征,提出了一种基于故障电流极性特 征的保护原理。但考虑到保护判据根据阈值整定, 当存在噪声及暂态电流波动时,该保护原理的适应 性需要进一步讨论,且VSC和半桥型MMC系统闭锁 后,仍存在较大的短路电流,对于故障电流的开断能 力具有较高要求。

考虑换流器的主动故障限流策略[21-22]成为当前

的研究热点,其中与半桥型和全桥型MMC相比,混 合式MMC由半桥和全桥子模块共同构成,在保证直 流故障限流能力的基础上具有一定的经济优势,如 在建的乌东德直流工程即采用了混合式MMC。采 用主动故障限流策略后,由于直流故障的相关电气 量信息始终处于可控状态,换流器并不会因为过电 流而发生闭锁现象,因此可留出更大的时间裕度用 于直流故障的保护判别;且不再需要造价昂贵、开断 容量有限的直流断路器,取而代之的是隔离开关或 开断容量较低的直流断路器,使得直流电网故障保 护策略更加灵活多样。

目前鲜有面向换流器的主动故障限流策略结合 直流电网保护原理的研究,考虑现有的基于极性特 征的纵联保护原理大多存在局限性,如投入时间较 短、直流系统闭锁后故障信息的获取受限、在某些场 景下对故障电流开断能力的要求较高等,本文在原 有基于极性特征的纵联保护原理的基础上,引入斯 皮尔曼相关性判别法,重构相关性系数数列,同时发 挥换流器的高可控性,在考虑故障限流作用的基础 上,提出计及换流器主动故障限流策略的保护原理。

1 故障电流特征分析

直流侧线路故障主要有2个阶段:第1个阶段为 电容放电阶段,第2个阶段为主动故障限流阶段。

1.1 电容放电阶段

对于混合式 MMC, 在发生故障的初瞬间, 主要 表现为电容放电, 则有:

$$\begin{cases} i_{dc}(t) = -\frac{1}{\sin \theta_{dc}} I_{dc(0)} e^{-\frac{t}{\tau_{dc}}} \sin \left(\omega_{dc} t - \theta_{dc}\right) + \\ \frac{U_{dc}}{R_{dis}} e^{-\frac{t}{\tau_{dc}}} \sin \left(\omega_{dc} t\right) \\ \tau_{dc} = \frac{4L_{arm} + 6L_{dc}}{2R_{arm} + 3R_{dc}} \\ \\ \omega_{dc} = \sqrt{\frac{2N(2L_{arm} + 3L_{dc}) - C_0(2R_{arm} + 3L_{dc})^2}{4C_0(2L_{arm} + 3L_{dc})^2}} \quad (1) \\ \theta_{dc} = \arctan(\tau_{dc}\omega_{dc}) \\ \\ R_{dis} = \sqrt{\frac{2N(2L_{arm} + 3L_{dc}) - C_0(2R_{arm} + 3L_{dc})^2}{36C_0}} \end{cases}$$

其中, $i_{de}(t)$ 为电容放电阶段的直流电流; L_{arm} 、 R_{arm} 、 C_0 分别为桥臂的等效电感、电阻、子模块电容值;N为桥臂子模块数; θ_{de} 为直流电流的初相位; ω_{de} 为直流 电流的角频率; R_{die} 为MMC桥臂放电的等效电阻; $I_{de(0)}$ 为MMC直流侧发生故障前的直流电流; R_{de} 和 L_{de} 分别为直流侧的等效电阻和电感; τ_{de} 为换流器电容放电阶段的衰减时间常数。 由式(1)可知,在进行故障限流前的电容放电阶段,*i*_{de}(*t*)包含2个分量,即由于电感元件不能突变而 产生的续流和子模块电容的放电电流。考虑在采用 故障限流策略前,主要表现为电容放电状态,2个分 量的叠加将使故障电流迅速增大。

规定母线流向线路为正方向,对区内故障的分 析如下。

(1)极间故障。当发生极间故障时,在电容放电阶段,主要以子模块电容放电过程为主。由于正、负极极性的差异,参考方向设定为由母线流向线路。对于正极线路,两侧故障电流流向故障点,均呈现正极性特征;对于负极线路,两侧故障电流流出故障点,均呈现负极性特征。因此对于故障极线路,两侧故障电流呈现同极性特征。

(2)单极接地故障。其分析方法与极间故障类 似,对于故障极线路,两侧故障电流呈现同极性特 征;对于非故障极线路,两侧电流表现为贯穿式电 流,极性相反。

对于区外故障,无论是正极线路还是负极线路, 两侧故障电流均表现为贯穿式电流,极性相反。

另外,在故障初瞬间可能受负荷电流的短暂影 响(其本质为电感元件不能突变而造成的续流现 象),使得故障电流存在极短时间的过渡阶段,具体 过程将在第3节进行分析。

1.2 主动故障限流阶段

1.2.1 故障限流基本原理

混合式 MMC 控制策略中的控制回路采用与半桥式 MMC 类似的闭环控制,但外环的桥臂电压控制 为桥臂中子模块电容电压的平均值,采用均压排序 算法^[21-22]设定电容电压允许波动的上、下限,从而投 入或者切除子模块。混合式 MMC 故障限流策略如 附录 A 图 A1 所示。结合图 A1,上述过程可表示为:

$$U_{\rm deref} = K_{\rm p} \left(I_{\rm deref} - I_{\rm dc} \right) + K_{\rm i} \left[\left(I_{\rm deref} - I_{\rm dc} \right) dt \right]$$
(2)

其中,K_p和K_i分别为比例和积分系数;U_{deref}、I_{deref}、I_{de}分别为直流电压参考值、直流电流参考值以及直流电流测量值。

考虑上桥臂参考电压 V_{refy}、下桥臂参考电压 V_{refy},可表示为式(3)所示形式,则上、下桥臂投入的全桥 子模块数量可表示为式(4)所示形式。

$$\begin{cases} V_{\text{refp}} = 0.5U_{\text{deref}} - u_j \\ V_{\text{refn}j} = 0.5U_{\text{deref}} + u_j \end{cases}$$
(3)

$$\begin{cases}
n_{p} = \operatorname{round}\left[\left(0.5U_{deref} - u_{j}\right)/U_{Cn}\right] \\
n_{n} = \operatorname{round}\left[\left(0.5U_{deref} + u_{j}\right)/U_{Cn}\right]
\end{cases}$$
(4)

其中, $j=a,b,c;u_j$ 为交流侧的交流电压; n_p,n_n 分别为上、下桥臂投入的全桥子模块数量; U_{Cn} 为子模块电容电压额定值;round[\cdot]表示取整。

由于全桥子模块可以输出负电平,则换流器等 效输出的桥臂子模块总数N₁可表示为:

$$N_1 = n_p + n_n \tag{5}$$

由式(2)—(5)可知,混合式MMC将外环电压控 制输出的直流电流参考值 I_{deref} 作为内环控制的输 入,并经过比例–积分(PI)环节输出直流电压参 考值,作用于子模块投切过程,从而控制直流电压、 电流。其中 I_{deref} 设定为预定的直流电流定值 I_{deset} = 0.2 p.u.。

本文将电压跌落作为主动故障限流启动判据之 一^[21-22]。考虑在判别过程中子模块可能因过流而闭 锁,因此本文的启动判据也将直流电流变化作为主 动故障限流启动判据之一。由于直流电流与子模块 过流直接相关,子模块的耐受故障电流能力为额定 值的2倍,因此本文在考虑安全裕度范围的基础上, 将电流判据设定为额定电流的1.5倍。

综上所述,当MMC系统检测到直流电压幅值小 于额定电压的1/2或直流电流幅值大于额定电流的 1.5倍时,切换至主动故障限流模式,确保直流故障期 间IGBT不会因桥臂过流而闭锁,且可维持交流电压, 从而为交流侧提供无功功率支撑,实现故障穿越。 1.2.2 故障电流特征

故障情况下采用主动故障限流策略,其等效简 化电路图如图1所示。图中,*i*_j为交流电流;*R*_{ac}和*L*_{ac} 分别为交流侧的等效电阻和电感;*i*_{jy},*i*_{ij}分别为上、下 桥臂电流;*U*_{amp}、*U*_{amn}分别为暂态投入的单相上、下桥 臂投入的子模块等效电压总和;*i*_{de}、*u*_{de}分别为直流电 流、电压。



图 1 故障情况下混合式 MMC 控制电路 Fig.1 Control circuit of hybrid MMC during fault

根据基尔霍夫电流定律可知:

$$i_{\rm pa} + i_{\rm pb} + i_{\rm pc} = i_{\rm dc}$$
 (6)

根据交流电压*u_j* 与极对地电压*u_{de}*/2的关系,可得到单相上桥臂电流的微分方程为:

$$u_{a} - R_{ac}i_{a} - L_{ac}\frac{di_{a}}{dt} - R_{arm}i_{pa} - L_{arm}\frac{di_{pa}}{dt} + U_{armp} = \frac{u_{dc}}{2} \quad (7)$$

考虑子模块投切过程中,全桥子模块具有负电 平输出能力,因此单相上、下桥臂子模块等效电压总 和为式(1)中的 U_{dref} ,即 $U_{armp}+U_{armn}=U_{deref}$ 。对式(7)进 行求和,代人式(6)可得:

$$-R_{\rm arm}\dot{i}_{\rm dc} - L_{\rm arm}\frac{{\rm d}\dot{i}_{\rm dc}}{{\rm d}t} + \frac{3}{2}U_{\rm dcref} = \frac{3u_{\rm dc}}{2}$$
(8)

当考虑故障点存在过渡电阻*R*_r时,对直流侧故障回路列写回路方程,则有:

$$R_{\rm de}i_{\rm de} + R_{\rm f}i_{\rm de} + L_{\rm de}\frac{{\rm d}i_{\rm de}}{{\rm d}t} = \frac{u_{\rm de}}{2}$$
(9)

因此,结合式(8)和式(9),MMC 直流侧端口直 流侧电流 $i_{de}(t)$ 可表示为:

$$\begin{cases} i_{dc}(t) = (i_{dc(2)} - i_{1}) e^{-\frac{R_{arm} + 3R_{dc} + 3R_{f}}{L_{arm} + 3L_{dc}}(t - t_{1})} + i_{1} \\ i_{1} = \frac{3}{2} U_{dcref} / (R_{arm} + 3R_{dc} + 3R_{f}) \end{cases}$$
(10)

其中,*i*₁为主动故障限流阶段投入子模块馈入的电流;*i*_{de(2)}为进入主动故障限流阶段前的初始直流电流值;*t*₁为MMC启动主动故障限流策略的时间。

由式(10)可知,随着主动故障限流策略的启动,*i*_{dc(2)}开始逐渐衰减,直流电流向主动故障限流阶段投入子模块馈入的电流过渡。由于可以通过*i*₁调节*U*_{dcref}进而控制子模块投入数量,实现故障电流限制,而*U*_{dcref}是通过*I*_{dcref}经PI环节调节的,因此故障限流策略可以在很大程度上控制直流故障电流。

主动故障限流阶段前、后混合式MMC端口的直流电流如图2所示。由图2可知,整个电容放电阶段 主要表现为电容放电状态,使得故障电流迅速上升。 当采用主动故障限流策略后,换流器端口的直流电 流由电容放电阶段切换至故障限流阶段,故障电流 受到有效限制,最终稳定在设定的参考值附近。对于 线路而言,主动故障限流策略仅对故障电流幅值进 行有效抑制,不会改变原来的故障电流流向,因此主 动故障限流阶段的电流极性与电容放电阶段一致。



图2 直流故障电流演变



1.3 故障电流极性特征

结合电容放电阶段与主动故障限流阶段,以图3 所示的混合式MMC三端系统中,线路L₁—L₃中点发 生单极接地、极间故障为例,对线路L₁两侧的故障电 流极性进行分析。图中,m、n为线路L₁的保护安装处。



图3 三端混合式MMC直流电网

Fig.3 Three-terminal hybrid MMC DC grid

线路L₁发生单极接地 f_{PTC} 、极间故障 f_{PTP} 的示意 图如图4所示,图中MMC_{1p}、MMC_{1n}分别为上、下桥臂 的MMC。线路L₂、L₃发生单极接地、极间故障的示 意图如图5所示。根据图4、5,线路L₁的m、n处流过 的故障电流极性如附录A表A1所示。



图4 直流线路L₁故障示意图

Fig.4 Schematic diagram of fault at DC line L₁







2 保护原理

2.1 斯皮尔曼相关性系数的引入

由第1节可知,对于直流线路区内故障,故障极 线路两侧的故障电流极性相同,而非故障极线路两 侧的故障电流极性相反。对于区外故障,两侧的故 障电流极性相反。基于上述特点,本文引入斯皮尔 曼相关性系数^[20],通过检验2个变量是否具有同步 的变化趋势(同时增大或同时减小)衡量2个变量之 间的相关性。与皮尔逊相似性系数^[20]相比,斯皮尔 曼相关性系数不受数据量纲的影响,因此其对异常 数据不敏感,更适合处理离散型数据。 按积差方法计算斯皮尔曼相关性系数,以2个 变量*x*₁、*x*₂的等级数与其各自平均值的离差为基础, 通过2个变量的等级数之间离差相乘的形式反映变 量间的相关程度,其离散化表达式如式(11)所示。

$$r(x_{1}, x_{2}) = \frac{\sum_{s=1}^{N_{*}} (x_{1}(s) - \overline{x_{1}(s)}) (x_{2}(s) - \overline{x_{2}(s)})}{\sqrt{\sum_{s=1}^{N_{*}} (x_{1}(s) - \overline{x_{1}(s)})^{2} \sum_{s=1}^{N_{*}} (x_{2}(s) - \overline{x_{2}(s)})^{2}}} (11)$$

其中, $r(x_1, x_2)$ 为斯皮尔曼相关性系数,其取值范围为[-1,1];s表示第s个采样点; N_s 为采样点总数; "—"表示取平均值。

当 $r(x_1, x_2) < 0$ 时,2个变量呈负相关性,即一个 变量的增加可能引起另一个变量的减少;当 $r(x_1, x_2) = 0$ 时,2个变量不具有相关性;当 $r(x_1, x_2) > 0$ 时,2个变量呈正相关性,即一个变量的增加可能引 起另一个变量的增加。其中,当 $0 < r(x_1, x_2) < 0.5$ 时, 2个变量之间呈弱正相关性,即2个变量的相关性程 度较低;当 $0.5 < r(x_1, x_2) < 1$ 时,2个变量之间呈强正 相关性;当 $r(x_1, x_2) = 1$ 时,2个变量为完全正相关。

2.2 保护判据构建

2.2.1 保护启动判据

当发生线路故障时,保护安装处将感受到故障 电流与故障电压幅值的变化,因此可以利用故障电 流、电压幅值作为启动判据。一方面,考虑故障极与 非故障极的耦合作用,同时降低故障初瞬间负荷电 流的影响;另一方面,为使得保护在电容放电阶段仍 具有判别故障的能力,保护的启动应早于故障限流 策略的启动,因此电流整定值 *I*_{set}设定为1.2 p.u.,电 压整定值 *U*_{set}设定为0.8 p.u.,启动判据为:

$$\left|i(k)\right| > I_{\text{set}} \stackrel{\text{def}}{=} \left|u(k)\right| < U_{\text{set}} \tag{12}$$

其中,*i*(*k*)和*u*(*k*)分别为电流和电压的瞬时值。 2.2.2 保护主判据

考虑直流线路区内故障,故障极线路两侧的故 障电流极性相同,但其幅值大小与线路的故障距离 密切相关,当直接利用原始数据进行相关性判别时, 其相似性系数可能受到两侧波形的幅值、形状差异 的影响,导致保护的灵敏度降低。而非故障极线路 两侧的电流极性相反,该特征有利于对非故障线路 进行相关性判别。

综合考虑区、内外线路两侧电流波形的相关性特征,为进一步提高区内故障识别的灵敏度,本文对用于相关性判别的线路两侧电流 $i_n(g)$ 和 $i_n(g)(g表示第g个采样时刻)进行重构,进而提出改进型故障电流极性特征序列<math>y(g),z(g)$ 如式(13)所示。

$$\begin{cases} y(g) = i_m(g)i_n(g) \\ z(g) = |i_m(g)||i_n(g)| \end{cases}$$
(13)

其中,y(g),z(g)分别为第g个采样时刻的特征序列y,z的数据。

由式(13)可知,发生区内故障时,由于两侧故障 电流极性相同,y(g)、z(g)的波形理论上基本重合, 变化趋势相同。与故障电流的原始波形 $i_n(g)$ 和 $i_n(g)$ 相比,y(g)、z(g)的波形相似度更高,它们能够 反映故障线路两侧电流的变化趋势和方向,且不受 线路两侧原始电流幅值大小的影响。发生区外故障 时,y(g)、z(g)的波形变化趋势相反,相似度较低,与 发生区内故障时的波形有较大的差异。当发生区 内、区外故障时,y(g)、z(g)分别呈正、负相关性,以 此构造保护动作判据。

将式(13)中的数据序列替换成等级数后,代入 式(11),构建斯皮尔曼相关性系数r(y,z)如式(14) 所示。根据式(14)对直流电网故障区域进行判别。

$$r(y,z) = \frac{\sum_{s=1}^{N_{w}} \left(y(s) - \overline{y(s)} \right) \left(z(s) - \overline{z(s)} \right)}{\sqrt{\sum_{s=1}^{N_{w}} \left(y(s) - \overline{y(s)} \right)^{2} \sum_{s=1}^{N_{w}} \left(z(s) - \overline{z(s)} \right)^{2}}}$$
(14)

其中,N_w为数据窗对应的采样点数。

通过将r(y,z)与设定的正相关性系数门槛值r_{set} 进行比较,可进行相关度的判别,进一步确定直流电 网故障区域。计及主动故障限流策略的直流电网保 护动作判据为:

$$r(y,z) > r_{\rm set} \tag{15}$$

当满足式(15)时,符合正相关性,判定为区内故 障,反之为区外故障。为提高保护动作的可靠性,同 时兼顾保护动作的灵敏性,r_{set}理论上应越大越好。 发生区内故障时,相关性系数最大值理论上为1,发 生区外故障时,两侧故障电流极性相反,相关性系数 理论上的极值为-1。但保护算法可能受到测量误 差、噪声、故障初瞬间的负荷电流等因素的影响。其 中,测量误差易受电流互感器影响,考虑电流互感器 误差最大不超过10%;由于通信需利用通信通道, 在信号传输时存在噪声干扰;故障初瞬间,负荷电流 将带来短暂的过渡过程。考虑上述因素后,保护算 法应留有一定的裕度,但仍应满足强正相关性,故将 r_{set}设定为0.5。

3 保护性能的相关问题讨论

3.1 分布电容电流的影响

一方面,引入低通滤波器可减少线路的分布电容电流引起的高频分量的影响^[23]。在相同的技术指标下,无限冲激响应(IIR)滤波器由于存在着输出对输入的反馈,因而可用比有限冲激响应(FIR)滤波器少的阶数来满足指标的要求,使得所用的存储单元和运算次数减少,较为经济。因此本文采用截止频

率为300 Hz的10阶巴特沃斯低通滤波器对信号进 行滤波处理。另一方面,尽管分布电容的暂态电流 特性会造成直流暂态电流波形波动,但并不会影响 电流波形的整体变化趋势,当采用波形相似性判别 方法时,会进一步提高保护原理抗干扰性能^[15]。

3.2 过渡电阻的影响

考虑过渡电阻仅对幅值造成影响,对于混合式 MMC电容放电过程,直流线路两侧电流极性不受过 渡电阻影响。在主动故障限流阶段,直流线路两侧 的故障限流策略仅对故障电流幅值进行有效抑制, 而不改变原来的故障电流流向,则该阶段的故障电 流的极性与电容放电阶段一致。因此,本文提出的 保护原理具有较强的抗过渡电阻性能。

3.3 负荷电流影响

由于故障初瞬间负荷电流的影响(其本质为电 感不能突变而产生的续流),故障电流在故障发生的 初瞬间存在一个极短的过渡过程^[18]。但由于在换流 器电容放电阶段,主要表现为换流器电容的放电状 态。因此,当负荷电流与电容放电电流方向一致;当负荷电流 故障电流与电容放电电流的方向一致;当负荷电流 与电容放电电流方向相反时,故障电流存在一个极 短的过渡过程,即由负荷电流方向过渡至电容放电 电流的状态,故障电流将会出现极性反转。

以线路L₁—L₃中点发生极间故障为例,参考方 向为母线流向线路,其中正常运行时的负荷电流方 向以n流向m为例。线路L₁的m、n侧保护安装处的 负荷电流、电容放电电流示意图如图6所示,故障初 瞬间的故障电流过渡阶段情况如表1所示。



图 6 负荷电流和电容放电电流示意图 Fig.6 Schematic diagram of load current and capacitor discharging current

表1 故障电流的过渡过程

able i fiansition process of fault current	Fable 1	Transition	process	of	fault	current
--	---------	------------	---------	----	-------	---------

故障线路	负荷电流与电容放电 电流的极性		故障电流极性是否 发生反转	
	<i>m</i> 侧	n 侧	<i>m</i> 侧	n 侧
L ₁	相反	相同	是	否
L_2	相同	相同	否	否
L_3	相反	相反	是	是

由表1可知,在故障初瞬间,由于负荷电流与电 容放电的极性可能相反,故障电流在故障发生的初瞬 间存在一个极短的过渡过程,出现极性反转现象。

由于负荷电流引起的过渡过程仅出现在故障初瞬间,持续时间极短,考虑本文的保护原理设有保护启动判据,且对原始数据序列进行了重构,采用的斯皮尔曼相关性判别方法不受数据量纲影响,在相关性判别的阈值上也考虑了负荷电流的影响,因此本文方法可在一定程度上克服该过渡阶段造成的影响。

4 保护方案实现流程

当直流系统发生故障时,换流器将检测到直流 系统故障,随后切换至主动故障限流模式,保护在满 足保护启动判据时也将启动,具体流程图如图7所 示。图中,r_p和r_n分别为正、负极的相关性系数。



Fig.7 Flowchart of protection

5 仿真算例

按照图 3 在 PSCAD / EMTDC 中搭建 ±400 kV 双 极三端柔性直流输电系统。直流线路采用分布参数模 型下的依频参数线路模型,长度均为 300 km。换流站 采用混合式 MMC 模型,其额定总容量为 800 MV·A, 子模块电容值为5 mF,子模块投切周期为100 μs, 桥臂子模块数量为200,其中半桥子模块数量为100, 全桥型子模块数量为100,桥臂电抗器的电感值为 29 mH。限流电抗的选择应考虑故障限流作用下的 系统稳定性并避免换流器自闭锁,因此限流电抗器 的电感值宜选择20~300 mH^[22],本文选择100 mH作 为限流电抗器仿真参数。交流系统电压为380 kV, 变压器额定电压为380 V / 220 kV,其等效短路阻抗 为18%。

仿真采样频率为10 kHz,仿真时长为2 s,故障 发生时间为1 s,持续时间为1 s。利用 PSCAD 得到 仿真数据,导入 MATLAB 对本文方法进行验证。为 验证本文方法在换流器故障响应全过程中的性能, 数据窗应能够包含电容放电阶段、主动故障限流阶 段。但数据窗不宜选取得过长,因为当直流侧发生 故障时,为减小停电范围、保证选择性要求,直流侧 保护应优先于交流侧保护动作。因此选取保护原理 启动后 20 ms以内的数据窗长进行验证。

5.1 保护原理性能对比验证

对比传统相关性判别方法与本文重构序列结合 斯皮尔曼相关性判别方法的性能,其中传统方法采 用原始数据结合皮尔逊相关性判别方法。以最严重 的极间故障为例,将区内故障设置为线路L₁首端发 生极间故障 $f_{1.0}$ 、末端发生极间故障 $f_{1.300}$,区外故障设 置为线路L₂中点发生极间故障 $f_{2.150}$ 、线路L₃中点发 生极间故障 $f_{3.1500}$ 、发生故障 $f_{1.0}$ 时,正极两侧原始离 散化数据序列 $i_m(g)和i_n(g)$,重构后的离散化数据序 列y(g)、z(g),以及不同数据窗长 τ 下的正、负极相 关性判别结果如图 8 所示,其他故障条件下的结果 见附录B图 B1 — B3。





以相关性判别算法的典型数据窗长3、10、20 ms 为例,将传统方法与本文方法的结果分别汇总至表 2和表3。

表 2 传统方法的结果 Table 2 Results of traditional method

故障	τ / ms	相关性系数		判别结果		保护动作
		正极	负极	故障区域	故障极	结果
	3	0.689	0.654	区内	极间	动作
f_{1-0}	10	0.502	0.673	区内	极间	动作
	20	0.796	0.802	区内	极间	动作
	3	0.998	0.989	区内	极间	动作
f_{1-300}	10	0.674	0.735	区内	极间	动作
	20	0.804	0.793	区内	极间	动作
	3	0.764	0.773	区内	极间	存在误动风险
f_{2-150}	10	-0.993	-0.994	区外	_	不动作
	20	-0.988	-0.986	区外	_	不动作
	3	-0.996	-0.994	区外	_	不动作
f_{3-150}	10	-0.995	-0.993	区外	_	不动作
	20	-0.994	-0.992	区外	_	不动作

表3 本文方法的结果

Table 3 Results of proposed method

北应	_ /	相关性	生系数	判别约	保护动作	
取陧	τ / ms	正极	负极	故障区域	故障极	结果
	3	1.000	1.000	区内	极间	动作
f_{1-0}	10	1.000	1.000	区内	极间	动作
	20	1.000	1.000	区内	极间	动作
	3	1.000	1.000	区内	极间	动作
f_{1-300}	10	1.000	1.000	区内	极间	动作
	20	1.000	1.000	区内	极间	动作
	3	-1.000	-0.966	区内	极间	不动作
f_{2-150}	10	-0.993	-0.995	区外	_	不动作
	20	-0.994	-0.993	区外	_	不动作
	3	-0.994	-0.993	区外		不动作
f ₃₋₁₅₀	10	-0.993	-0.995	区外	_	不动作
	20	-0.996	-0.994	区外	_	不动作

由仿真结果可以看出,发生区内故障时,本文方 法得到的正、负极相关性系数在不同长度的数据窗 下均大于门槛值,且相对门槛值仍留有较大裕度,保 护原理具有较高的可靠性。传统方法所得到的相关 性系数相对门槛值的裕度较小,因此灵敏度较低,区 内故障下存在保护拒动的风险。可见,本文方法相 比传统方法具有更好的区内故障判别能力。发生区 外故障时,本文方法得到的正、负极相关性系数远小 于门槛值,保证了保护在区外故障下不误动。而传 统方法在区外故障下存在误动风险,保护的可靠性 降低。

另外,对于负荷电流的影响,以附录B图B3为 例,由于负荷电流与电容放电电流方向相反,两侧的 故障电流将会出现极性反转。考虑到极性反转后的 两侧故障电流极性仍相反,且针对反转点附近的数 据采样点,本文设定保护启动判据,对数据序列进行 重构,并采用不受数据量纲影响的斯皮尔曼相关性 判别方法,所以保护在留有较大裕度的基础上仍能 正确不动作。

5.2 抗过渡电阻性能验证

为验证本文重构序列结合斯皮尔曼相关性判

别方法的抗过渡电阻性能,将区内故障设置为线路 L₁首端正极经150 Ω 过渡电阻接地故障 f'_{1-0} 、末端正 极经150 Ω 过渡电阻接地故障 f'_{1-300} ,区外故障设置 为线路L₂中点发生正极经150 Ω 过渡电阻接地故障 f'_{2-150} 、线路L₃中点发生正极经150 Ω 过渡电阻接地故 障 f'_{3-150} 。发生故障 f'_{1-0} 时的仿真结果如图9所示,其 他故障条件下的仿真结果见附录C图C1—C3。典 型数据窗长3、10、20 ms下的抗过渡电阻性能验证 结果如表4所示。



图9 发生故障 f'_{1-0} 时的仿真结果

Fig.9 Simulative results under f'_{1-0} fault

表4 本文方法的抗过渡电阻性能验证结果

Table 4Verification results of anti-transitionresistanceperformance with proposed method

十七四六	/	相关性	生系数	判别结果		保护动作
议陧	τ /ms	正极	负极	故障区域	故障极	结果
	3	1.000	-0.997	区内	正极	动作
f'_{1-0}	10	1.000	-0.987	区内	正极	动作
	20	1.000	-0.964	区内	正极	动作
f_{1-300}'	3	1.000	-0.967	区内	正极	动作
	10	1.000	-0.927	区内	正极	动作
	20	1.000	-0.798	区内	正极	动作
	3	-1.000	-0.992	区外	_	不动作
f_{2-150}'	10	-0.784	-0.732	区外	—	不动作
	20	-0.702	-0.708	区外	—	不动作
f'_{3-150}	3	-0.993	-0.991	区外	—	不动作
	10	-0.995	-0.964	区外	_	不动作
	20	-0.995	-0.856	区外	_	不动作

由仿真结果可见,发生区内高阻故障时,本文方 法得到的正、负极相关性系数在不同长度的数据窗 下均大于整定值,且相对门槛值仍留有较大裕度,保 护原理具有较强的抗过渡电阻性能。发生区外故障 时,本文方法得到的正、负极相关性系数远小于门槛 值,保证了保护原理在区外故障下不会发生误动现 象。另外,本文方法由于采用了启动判据,且利用重 构数据结合斯皮尔曼相关性判别的原理,因此受负 荷电流的影响较小。

5.3 抗干扰性能验证

考虑实际工程中外界噪声和互感器传变误差对 保护的干扰,利用随机高斯白噪声对本文方法的抗 干扰性能进行验证。选取信噪比为30 dB的白噪 声,以最严重的极间故障为例,故障设置同5.1节。 典型数据窗长为3、10、20 ms下的抗干扰能力验证 结果如表5所示。

表5 本文方法的抗干扰性能验证结果

Table 5 Verification results of anti-interference

performance with proposed method

北陸	au / ms -	相关性系数		判别结果		保护动作
以陸		正极	负极	故障区域	故障极	结果
	3	1.000	1.000	区内	极间	动作
f_{1-0}	10	1.000	1.000	区内	极间	动作
	20	1.000	1.000	区内	极间	动作
	3	1.000	1.000	区内	极间	动作
f_{1-300}	10	1.000	1.000	区内	极间	动作
	20	1.000	1.000	区内	极间	动作
	3	-0.928	-0.923	区外	_	不动作
f_{2-150}	10	-0.936	-0.931	区外	_	不动作
	20	-0.933	-0.942	区外		不动作
	3	-0.931	-0.946	区外		不动作
f ₃₋₁₅₀	10	-0.925	-0.932	区外	_	不动作
	20	-0.917	-0.965	区外	_	不动作

由仿真结果可以看出,由于本文根据电流波形的极性及形状特征构成保护原理,且对原始数据预 先进行滤波处理,并利用重组数据序列配合斯皮尔 曼相关性性判别原理,因此保护原理本身具有较强 的鲁棒性,能够保证在不同数据窗长下均具有较强 的抗干扰能力。

5.4 不同采样率下的性能验证

以线路L₁区内(线路中点处)发生经150Ω过渡 电阻的正极接地故障为例,在采样频率为5、10、15、 20kHz下对本文方法进行性能验证,结果如表6所示。

表6 不同采样率下本文方法的性能验证结果

Table6 Verification results of performances with proposed method under different sampling rates

proposed method under unterent sumpting futes							
采样频率 /	- /	相关性系数		判别结果		保护动作	
kHz	7 / ms	正极	负极	故障区域	故障极	结果	
	3	1.000	-0.993	区内	正极	动作	
5	10	1.000	-0.965	区内	正极	动作	
	20	1.000	-0.938	区内	正极	动作	
10	3	1.000	-0.994	区内	正极	动作	
	10	1.000	-0.978	区内	正极	动作	
	20	1.000	-0.932	区内	正极	动作	
	3	1.000	-0.995	区内	正极	动作	
15	10	1.000	-0.979	区内	正极	动作	
	20	1.000	-0.936	区内	正极	动作	
20	3	1.000	-0.991	区内	正极	动作	
	10	1.000	-0.982	区内	正极	动作	
	20	1.000	-0.943	区内	正极	动作	

由仿真结果可以看出,本文方法受采样频率影 响较小,在不同的数据窗长度下仍能够保证保护正 确动作,且所得到的相关性系数相对于门槛值仍留 有一定裕度。

6 结论

本文针对混合式 MMC 系统的高可控性, 计及主 动故障限流策略, 利用换流器对于故障的全响应状 态下的故障电流极性特征, 结合重构数据序列并引 入斯皮尔曼相关性系数, 提出了计及换流器主动故 障限流策略的纵联保护原理, 本文结论如下。

(1)在计及故障限流策略的基础上,分析故障电 流在换流器对故障全响应过程(包括电容放电阶段、 主动故障限流阶段)中的特征。由分析结果可知,当 发生区内故障时,故障极线路两侧故障电流极性相 同,非故障极线路两侧故障电流极性相反;发生区外 故障时,线路两侧故障电流极性相反。结合两侧直流 故障电流重构后的离散化数据序列和斯皮尔曼相关 性判别方法,可以进一步提高区内故障判别的灵敏度。

(2)本文利用故障电流波形特征,计及换流器主 动故障限流作用,能够在较长时间段投入,受分布电 容电流和负荷电流影响较小。另外,本文方法具有 较强的抗过渡电阻性能和抗干扰能力,受数据窗长 和采样率的影响较小。

(3)本文结合换流器控制策略与保护原理,使得 保护原理能够长时间获取故障有效信息,提高了原 有柔性直流电网传统保护原理的可靠性,且降低了 断路器的开断容量,具有一定的工程价值。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 刘剑,何雨微,徐祥海,等. 柔性直流电网故障限流技术分析与 探讨[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):9-16.
 LIU Jian,HE Yuwei,XU Xianghai,et al. Analysis and discussion of fault current limiting technology in flexible DC grid
 [J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):9-16.
- [2] 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 technology and prospect for coordinated control and protection in DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(23):23-30.
- [3] 宋国兵,高淑萍,蔡新雷,等.高压直流输电线路继电保护技术 综述[J].电力系统自动化,2012,36(22):123-129.
 SONG Guobing,GAO Shuping,CAI Xinlei,et al. Survey of relay protection technology for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(22):123-129.
- [4] 杨赛昭,向往,文劲宇.架空柔性直流电网线路故障保护综述
 [J].中国电机工程学报,2019,39(22):6600-6617.
 YANG Saizhao,XIANG Wang,WEN Jinyu. Review of DC fault protection methods for the MMC based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(22):6600-6617.
- [5] 吴通华,郑玉平,朱晓彤. 基于暂态电容电流补偿的线路差动 保护[J]. 电力系统自动化,2005,29(12):61-67.

131

WU Tonghua, ZHENG Yuping, ZHU Xiaotong. Current differential protection based on transient capacitance current compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (12):61-67.

- [6] 索南加乐,张怿宁,齐军. π模型时域电容电流补偿的电流差 动保护研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(5):12-18.
 SUONAN Jiale, ZHANG Yining, QI Jun. Study of current differential protection using time-domain capacitive current compensating algorithm on π-model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(5):12-18.
- [7] 董新洲,雷敖宇,汤兰西,等. 行波特性分析及行波差动保护技术挑战与展望[J]. 电力系统自动化,2018,42(19):185-191.
 DONG Xinzhou,LEI Aoyu,TANG Lanxi, et al. Analysis of traveling wave characteristics and challenges and prospects of traveling wave differential protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(19):185-191.
- [8]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.
 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.
- [9] 刘剑,邰能灵,范春菊,等.利用暂态测量阻抗的高压直流线路 故障识别方法[J].中国电机工程学报,2016,36(20):5504-5514.

LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A fault identification method for HVDC transmission lines based on transient measured-impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36 (20):5504-5514.

[10] 宋国兵,靳幸福,冉孟兵,等. 基于并联电容参数识别的 VSC-HVDC 输电线路纵联保护[J]. 电力系统自动化,2013,37(15): 76-82,102.

SONG Guobing, JIN Xingfu, RAN Mengbing, et al. Pilot protection for VSC-HVDC transmission lines based on shunt capacitance parameter identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15):76-82, 102.

[11] 李小鹏,田瑞平,罗先觉,等. 基于电流突变量比值的高压直流 输电线路纵联保护方案[J]. 电力自动化设备,2019,39(9): 33-38.

LI Xiaopeng, TIAN Ruiping, LUO Xianjue, et al. Pilot HVDC line protection scheme based on ratio of superimposed current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 33-38.

[12] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等.利用电流突变特性的高压直流 输电线路纵联保护新原理[J].电力系统自动化,2011,35(5): 52-56.

GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A new pilot protection principle for HVDC transmission lines based on current fault component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5):52-56.

- [13] 张艳霞,马桦岩,李婷,等. 基于Kaiser窗滤波的高压直流输电 线路突变量功率保护[J]. 高电压技术,2016,42(1):19-25.
 ZHANG Yanxia, MA Huayan,LI Ting, et al. HVDC line protection based on the mutant power through Kaiser window
 [J]. High Voltage Engineering,2016,42(1):19-25.
- [14] 邢鲁华,陈青,高湛军. 基于电压和电流突变量方向的高压直 流输电线路保护原理[J]. 电力系统自动化,2013,37(6): 107-113.

XING Luhua, CHEN Qing, GAO Zhanjun. A new protection principle for HVDC transmission lines based on directions of fault components of voltage and current [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6):107-113.

- [15] 王聪博, 贾科, 毕天妹, 等. 基于暂态电流波形相似度识别的柔性直流配电线路保护[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3823-3832.
 WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Protection for flexible DC distribution system based on transient current waveform similarity identification[J]. Power System Technology, 2019, 43 (10): 3823-3832.
- [16] 孔飞,张保会,王艳婷.基于行波波形相关性分析的直流输 电线路纵联保护方案[J].电力系统自动化,2014,38(20): 108-114.
 KONG Fei, ZHANG Baohui, WANG Yanting. A novel pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on waveform correlation analysis of traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(20):108-114.
- [17] 李斌,邱宏,洪潮,等. 基于电压源型换流器的柔性直流系统快速方向保护[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):1-8.
 LI Bin,QIU Hong,HONG Chao, et al. High-speed direction protection of flexible DC system based on voltage source converter[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(2): 1-8.
- [18] 李猛,贾科,张秋芳,等.基于全电流方向特征的柔性直流配电网纵联保护[J].电力系统自动化,2019,43(23):116-127,130.
 LI Meng,JIA Ke,ZHANG Qiufang, et al. Directional pilot protection for flexible DC distribution system based on instantaneous current directional characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(23):116-127,130.
- [19] 李斌,张纪航,刘海金,等.基于波形相似度分析的直流输电线路故障测距[J].电力自动化设备,2019,39(9):27-32,53.
 LI Bin, ZHANG Jihang, LIU Haijin, et al. Fault location of HVDC transmission lines based on waveform similarity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 27-32,53.
- [20] SPEARMAN C. The proof and measurement of association between two things[J]. International Journal of Epidemiology, 2010,39(5):1137-1150.
- [21] 周猛,向往,林卫星,等. 柔性直流电网直流线路故障主动限流 控制[J]. 电网技术,2018,42(7):2062-2072.
 ZHOU Meng, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Active current limiting control to handle DC line fault of overhead DC grid[J]. Power System Technology,2018,42(7):2062-2072.
- [22] 周猛,向往,左文平,等.柔性直流电网主动限流开断直流故障研究[J].中国电机工程学报,2019,39(23):6852-6866,7099.
 ZHOU Meng,XIANG Wang,ZUO Wenping, et al. Research on DC fault isolation of MMC based DC grid using the active current-limiting approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23):6852-6866,7099.
- [23] 杨奇逊. 微型机继电保护基础[M]. 北京:中国电力出版社, 2005:59-66.

作者简介:



宋国兵(1972—),男,河南信阳人,教授, 博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力 系统继电保护(E-mail:song.gb@163.com); 侯俊杰(1993—),男,新疆乌鲁木齐 人,博士研究生,通信作者,主要研究方向为 电力系统继电保护(E-mail:826686025@qq.

宋国兵

com)_o

(编辑 任思思)

(下转第138页 continued on page 138)

Static voltage stability analysis of offshore platform power system

based on source-load power dynamic matching

WANG Yansong¹, XUAN Dezhi¹, LI Qiang²

(1. College of New Energy, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;

2. CNOOC Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: The static voltage stability analysis of offshore platform power system is the premise to ensure its security and reliability. Aiming at the feature of multiple slack buses in offshore platform power system, an extended continuous power flow model is built based on the source-load characteristics of turbo-generator and rotating load group, which considers the source-load power dynamic matching characteristics. Aiming at small capacity characteristics of units in offshore platform power system and production requirement of rotating loads, the static voltage stability analysis boundary constraint is established based on the limits of unit output and bus voltage. The augmented Jacobian matrix of extended continuous power flow is deduced, and a static voltage stability analysis method based on Newton-Raphson method is proposed. The static voltage stability analysis results of an offshore platform power system show that, compared with the traditional Newton-Raphson method, the proposed method can not only find the voltage weak bus along with the load increase, but also give the output value of each unit adapting to the load increase.

Key words: static voltage stability; multiple slack buses; continuous power flow; source-load power dynamic matching; augmented Jacobian matrix

(上接第131页 continued from page 131)

Pilot protection of flexible DC grid considering active fault current limiting strategy

SONG Guobing¹, HOU Junjie¹, GUO Bing¹, WANG Ting¹, CHANG Zhongxue¹, SHEN Bing²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China)

Abstract: In view of the problems of low reliability and sensitivity when the traditional DC protection principle is applied to flexible DC grid, the pilot protection of flexible DC grid considering active fault current limiting strategy of converter is proposed. The polarity characteristics of fault current in the capacitor discharge stage and active fault current limiting stage of converter are analyzed. Then the improved polarity sequence of fault current is constructed, and the current waveform identification method based on Spearman correlation coefficient is introduced to realize the fault area identification of flexible DC grid. The simulative results show that the proposed protection principle can identify the fault area of flexible DC grid in the capacitor discharge stage and active fault current limiting stage of converter, and has high reliability and sensitivity.

Key words: flexible DC grid; active fault current limiting strategy; correlation discrimination; DC protection; relay protection





	•	
故障位置	正极线路两端极性	负极线路两端极性
fl(极间故障)	相同	相同
f1(正极故障)	相同	相反
f2(极间故障)	相反	相反
f2(正极故障)	相反	相反
f3(极间故障)	相反	相反
f3(正极故障)	相反	相反

附录 B





附录 C