

DOI: 10.7667/PSPC171402

基于边界消耗暂态谐波能量的柔性直流输电线路保护新方案

谢志远¹, 胡斌俞¹, 张卫民¹, 刘鑫蕊²

(1. 国网江苏省电力有限公司检修分公司(苏州运维站), 江苏 苏州 215131;

2. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 超导型故障限流器在柔性直流输电工程中能有效地限制故障电流的峰值和陡度, 类比于传统高压直流输电系统的物理边界。将超导型故障限流器看作是柔性直流输电系统的边界, 提出了一种基于边界消耗暂态谐波能量的柔性直流线路保护方案。该保护方案利用正极或负极线路整流侧边界消耗的暂态谐波能量启动保护, 利用两极线路的整流侧和逆变侧边界消耗的暂态谐波能量差辨别区内外故障, 利用正、负极线路整流侧边界消耗的暂态谐波能量之比进行故障选极。理论分析和仿真结果表明, 该保护方案适用于各种工况, 几乎不受过渡电阻和故障位置的影响, 且对采样率要求低, 具有重要的工程应用价值。

关键词: 柔性直流输电; 超导型故障限流器; 边界; 暂态谐波能量; 线路保护

A novel protection scheme for VSC-HVDC transmission lines based on boundary transient harmonic energy

XIE Zhiyuan¹, HU Binyu¹, ZHANG Weimin¹, LIU Xinrui²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch, Suzhou 215131, China;

2. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) can effectively limit the amplitude and derivative of the fault current in the Voltage Source Converter-High Voltage Direct Current (VSC-HVDC) transmission engineering. This paper regards SFCL as the boundary of the VSC-HVDC transmission system compared to the physical boundary of the traditional HVDC transmission system, and proposes a novel protection scheme for VSC-HVDC transmission lines based on boundary transient harmonic energy. The transient harmonic energy consumed by the boundary of the rectifier side of the positive or negative line is used as the startup component, the difference of transient harmonic energy consumed by the boundary of both rectifier side and inverter side of the bipolar lines is used to identify the internal and external fault, the ratio of transient harmonic energy consumed by the boundary of the rectifier side of the positive and negative line is used to select the fault pole in the proposed scheme. The theory analysis and simulation results show that this protection performs well under various situations, and it is almost not affected by fault resistance and fault location. In addition, high sampling frequency is not needed in this scheme, having important engineering value.

This work is supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 61433004).

Key words: voltage source converter-high voltage direct current (VSC-HVDC) transmission; superconducting fault current limiter (SFCL); boundary; transient harmonic energy; lines protection

0 引言

随着电力电子器件及相应控制技术的日益成熟, 基于全控型器件和脉宽调制(PWM)技术的电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)型柔性直流

输电技术得以迅速发展。其凭借无换相失败风险、可实现有功功率和无功功率的快速解耦控制、能向无源网路供电等优点, 在实际的输电工程中得到广泛应用^[1-3]。其中, 又以两电平 VSC 型柔性直流输电系统在实际工程中应用较为广泛^[4]。然而, 柔性直流输电线路跨区域广, 故障概率较大, 危害程度较严重; 且与传统的高压直流输电系统相比, 其

基金项目: 国家自然科学基金重点课题资助(61433004)

亦缺乏成熟的保护方案和直流开关器件^[5]。因此为了保证柔性直流输电系统的安全可靠运行, 必须解决相应的保护技术不足的问题。

目前, VSC 型柔性直流输电系统的保护技术多借鉴于传统的高压直流输电系统, 即通常以行波保护为主保护, 以电流差动保护为后备保护^[6-7]。该保护方案确实一定程度上达到了故障快速切除的目的, 但依然存在着很多缺点, 如: 对采样率要求高; 高阻接地时灵敏性差; 易受雷电干扰; 要求两端数据严格同步等^[8]。且该保护方案并未考虑 VSC 型柔性直流输电系统自身的特性, VSC 型柔性直流输电系统发生线路故障时, 直流侧的并联电容快速放电, 形成一个幅值极大、持续时间较短的故障电流, 且在二极管续流阶段和交流激励阶段, 尽管 VSC 中的可控型电力电子器件会被闭锁, 但由于续流二极管的存在, 仍会形成通路向故障点放电, 因此, 需要更为可靠、快速的保护方案。

文献[7]提出一种基于并联电容参数识别的 VSC-HVDC 输电线路纵联保护原理, 但将系统侧等效成并联大电容, 存在一定的误差, 且采用高频故障分量作为特征量, 难免会受到雷电干扰。文献[9]提出一种 VSC-HVDC 频变参数电缆线路电流差动保护原理, 该保护原理解决了分布电容电流对保护影响的问题, 但计算量较大, 且采用低定值长延时躲过暂态过程, 影响保护的速动性。近年来, 超导技术的突破性进步使超导型故障限流器 (Superconducting Fault Current Limiter, SFCL) 的实用化成为现实, 文献[4]在直流线路上串联 SFCL 以限制故障电流的幅值和陡度, 取得了较好的效果, 但无法做到故障线路的切除。传统高压直流输电系统中将平波器和滤波装置看作物理边界, 并提出了基于边界暂态能量的保护方案^[8,10], 取得了较好的效果, 文献[5]提到可借鉴传统高压直流输电边界保护的思想去构造 VSC 型柔性直流输电的边界保护原理。随着 SFCL 逐渐应用于柔性直流输电的实际工程中, 类比于传统高压直流输电系统中的物理边界, SFCL 可看作是柔性直流输电系统的“边界”, 若以该“边界”表现出的特性作为特征量, 可能构建出性能更为优良的柔性直流输电保护新原理。

本文通过分析柔性直流输电系统中线路“边界”的特性, 针对工程应用较广泛的两电平 VSC 型柔性直流输电系统, 提出了基于线路“边界”消耗的暂态谐波能量的保护新方案, 该保护方案利用两极线路的整流侧和逆变侧“边界”消耗的暂态谐波能量差, 可以快速有效地辨别区内、外故障。为了更好地应用于工程实际中, 本文给出了区内外故障

辨别的实用判据; 并利用正极或负极线路整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量, 构造了启动判据; 利用正、负极线路整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量之比, 构造了选极判据。大量仿真验证了本保护方案在各种工况下的有效性。

本文主要创新点如下:

1) 将 SFCL 看作是柔性直流输电系统的“边界”, 提出了基于“边界”消耗的暂态谐波能量的保护方案。

2) 区内外故障判据的整定中充分考虑了故障信号传输延迟, 解决了故障信号传输延迟对区内外故障正确辨别带来的问题。

3) 以整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量构建启动判据, 正常运行时, 该“边界”消耗的暂态谐波能量几乎为 0, 而故障时则很大, 差别明显, 便于检测, 且启动判据和选极判据均不依赖于通信, 可靠性高。

1 基于“边界”消耗故障暂态谐波能量的区内外故障特征分析

随着 SFCL 技术的发展和应用, 基于 VSC 的柔性直流输电系统在直流侧串联 SFCL^[4,11], 构成柔性直流输电系统的“边界”, 以限制直流侧故障电流上升的速度和峰值, 将会成为未来发展的趋势。SFCL 接入输电系统中, 当系统正常运行, SFCL 表现为零阻抗或极小阻抗, 对系统的运行无影响; 当系统内部发生故障时, 故障电流大于临界电流, SFCL 则呈现出高阻抗特性^[12], 从而实现对故障电流的有效限制。根据限流的阻抗特性, SFCL 可以分为电阻型 SFCL 和电抗型 SFCL 两类。在柔性直流输电系统中, 电阻型 SFCL 较电抗型 SFCL 限流性能更为优越^[4]。文中亦采用电阻型 SFCL。

基于两电平 VSC 的柔性直流输电系统主要由整流站、逆变站、直流输电线路、直流侧电容和 SFCL 等部分构成。图 1 所示为基于两电平 VSC 的柔性直流输电系统结构图。

由于双极性柔性直流输电系统的结构具有对称性, 正、负极线路独立运行, 故可将其认为是两个单极系统的组合。为了简明地阐述保护原理, 本文以正极输电线路为例进行分析。如图 1 所示: F1 为区内直流线路上的故障, F2 为区外整流侧电容器外侧的故障, F3 为区外逆变侧电容器外侧的故障, F4 为区外整流侧交流母线上的故障, F5 为逆变侧交流母线上的故障。

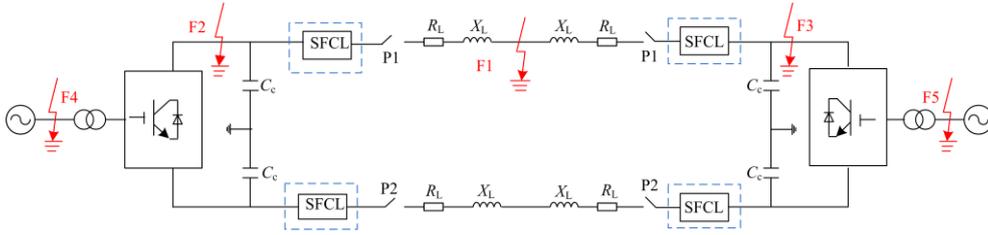


图 1 基于两电平 VSC 的柔性直流输电结构图

Fig. 1 Structure of two-level VSC-based DC system

柔性直流输电系统中“边界”的存在，在很大程度上降低了故障电流对系统的损害，但也使基于故障电流幅值和变化率的保护原理不能有效地辨别出区内、外故障，进而影响其保护动作。并且线路“边界”只是限制故障电流的幅值和上升速度，并不能将故障线路进行有效的切除。若反向思考，利

用线路“边界”所消耗的能量去辨别区内、外故障，可能会形成性能更优良的保护原理。本文以线路“边界”所消耗的故障暂态谐波能量作为特征量来辨别区内、外故障，进行相应的保护动作。

1.1 区内故障(图 2)

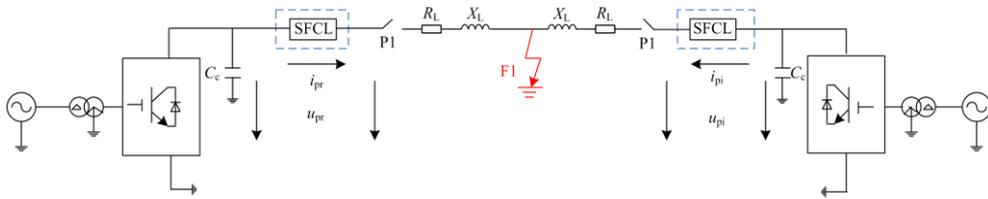


图 2 区内故障

Fig. 2 Internal fault

两电平 VSC 一般采用 PWM 控制，当直流输电线路发生故障时，在故障暂态过程中，即：两侧 VSC 的控制角尚未调整或已调整但未到稳定状态过程中。故障暂态电压、电流除了包含衰减直流分量外，还包含大量的 h 次谐波分量，谐波分量来自于两侧的 VSC。通常可以用式(1)表达^[10]。

$$\begin{cases} u(t) = u_0 e^{-t/\tau_1} + \sum_{h=1}^m u_h \sin(h\omega t + \varphi_h) \\ i(t) = i_0 e^{-t/\tau_2} + \sum_{h=1}^m i_h \sin(h\omega t + \theta_h) \end{cases} \quad (1)$$

式中： u_0 为电压衰减直流分量的初始值； i_0 为电流衰减直流分量的初始值； τ_1 和 τ_2 为衰减时间常数； u_h 和 φ_h 分别为 h 次电压谐波分量的幅值和相角； i_h 和 θ_h 分别为 h 次电流谐波分量的幅值和相角； ω 为基波分量角频率； m 为谐波最高次数。

由于柔性直流输电系统输电距离较长^[6-7]，故直流线路遭受雷电干扰的几率也越大，雷电干扰已成为影响直流线路保护装置正确动作的主要因素。因此，为了提高保护动作的正确率，应尽可能地减少雷电干扰带来的影响。文献[13]发现雷电干扰的暂态能量以高频为主，而短路故障的暂态能量以低频为主，所以，采用低频暂态分量可在很大程度上避

开雷电干扰，又考虑到本文采用整流侧和逆变侧“边界”消耗的暂态谐波分量作为特征量，若值过小，则不易进行区内、外故障的辨别。综合考虑，本文选取谐波的最高次数 $m=12$ 。

因此，定义正极整流侧“边界”上消耗的暂态谐波能量的计算值为

$$W_{pr}(t) = \int_{t_0}^{t_1} |u_{pr}(t)| \cdot |i_{pr}(t)| dt \quad (2)$$

同理，正极逆变侧“边界”上消耗的暂态谐波能量为

$$W_{pi}(t) = \int_{t_0}^{t_1} |u_{pi}(t)| \cdot |i_{pi}(t)| dt \quad (3)$$

式中： t_0 为发生故障的时刻； $t_1=t_0+T$ ， T 为积分数据窗长度； $u_{pr}(t) = \sum_{h=1}^{12} u_{prh} \sin(h\omega t + \varphi_{prh})$ ； $u_{pi}(t) =$

$$\sum_{h=1}^{12} u_{pih} \sin(h\omega t + \varphi_{pih})$$

$$i_{pr}(t) = \sum_{h=1}^{12} i_{prh} \sin(h\omega t + \theta_{prh})$$

； $i_{pi}(t) = \sum_{h=1}^{12} i_{pih} \sin(h\omega t + \theta_{pih})$ 。 u_{prh} 、 u_{pih} 、 φ_{prh} 、 φ_{pih} 分别为正极线路整流侧和逆变侧“边界”上的 h 次暂态谐波电压幅值和相角； i_{prh} 、 i_{pih} 、 θ_{prh} 、 θ_{pih} 分别为流过正极线路整流侧和逆变侧“边界”的 h 次暂态

谐波电流幅值和相角。

式(2)和式(3)中分别对 $u_{pr}(t)$ 、 $u_{pi}(t)$ 取绝对值, 使二者一直大于 0。从而使 $W_{pr}(t)$ 和 $W_{pi}(t)$ 的正负分别取决于 $i_{pr}(t)$ 和 $i_{pi}(t)$ 在 $[t_0, t_1]$ 时段内处于正半周波还是负半周波, 即: $i_{pr}(t)$ 在 $[t_0, t_1]$ 时段内处于正半周波时, $W_{pr}(t)$ 的符号为正; 反之为负。 $W_{pi}(t)$ 亦同理。

区内发生正极故障 F1 时, 整流侧和逆变侧的暂态谐波电流均流向故障点, 如图 2 所示。因此, 正极线路上整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量 $W_{pr}(t)$ 与逆变侧“边界”消耗的暂态谐波能量 $W_{pi}(t)$

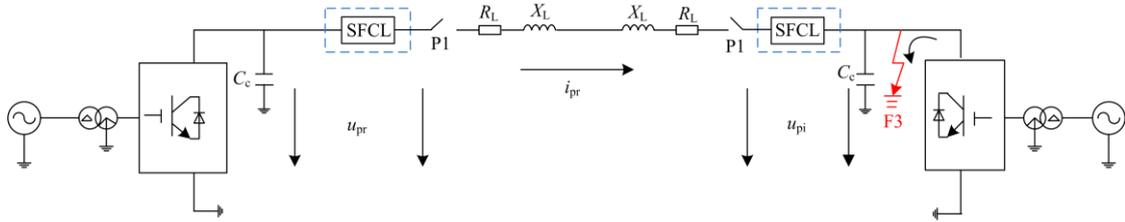


图 3 区外直流侧故障

Fig. 3 DC external fault

由于区外逆变侧电容器外侧故障时, 流过整流侧“边界”和逆变侧“边界”的暂态谐波电流全部来自于整流侧, 因此, 正极整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量 $W_{pr}(t)$ 与逆变侧“边界”消耗的暂态谐波能量 $W_{pi}(t)$ 符号相同, 大小相等。同理, 当区外整流侧电容器外侧发生正极接地故障时, 可得到相同的结论。

1.3 区外交流侧故障

区外逆变侧的交流母线上发生故障 F5 时, 如图 4 所示。逆变侧的暂态谐波电流亦会流向故障点 F5 处, 不会流过整流侧和逆变侧“边界”, 同上文中区外逆变侧电容器外侧发生故障 F3 一致, 流过

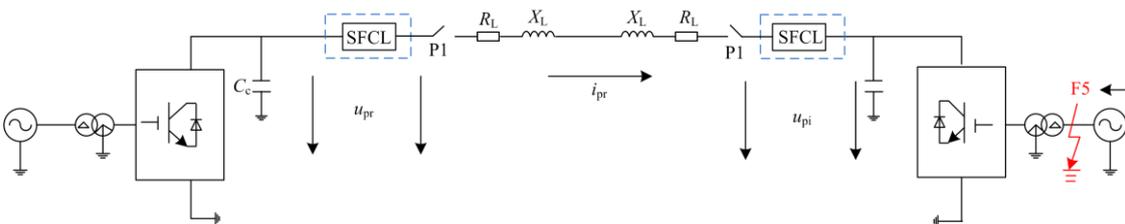


图 4 区外交流侧故障

Fig. 4 AC external fault

式中: $W_{pr}(t)$ 和 $W_{pi}(t)$ 分别为正极线路整流侧和逆变侧“边界”消耗的暂态谐波能量; $W_{nr}(t)$ 和 $W_{ni}(t)$ 分别为负极线路整流侧和逆变侧“边界”消耗的暂态谐波能量。

根据上述理论分析可知: 区内故障时, $\Delta W(t) > 0$; 区外故障时, $\Delta W(t) = 0$ 。因此, 根据两侧

符号相反。区内负极故障和双极故障时, 可得到相应的结论。

1.2 区外直流侧故障

如图 3 所示, 当区外逆变侧电容器外侧发生正极接地故障 F3 时, 逆变侧的暂态谐波电流在内部形成回路, 不会流过整流侧和逆变侧的“边界”。此时, 通过整流侧“边界”和逆变侧“边界”的暂态谐波电流全部来自于整流侧。此时, 整流侧和逆变侧“边界”上消耗的暂态谐波能量亦可由式(2)和式(3)分别求得。

整流侧和逆变侧“边界”的暂态谐波电流全部来自于整流侧。故可得到与上文 2.2 中相同的结论。同理, 区外整流侧的交流母线上发生故障时, 可得到相同的结论。

2 保护方案

2.1 区内外故障判别判据

定义两极线路的整流侧和逆变侧“边界”消耗的暂态谐波能量差为

$$\Delta W(t) = \Delta W_p(t) + \Delta W_n(t) = |W_{pr}(t) - W_{pi}(t)| + |W_{nr}(t) - W_{ni}(t)| \quad (4)$$

“边界”消耗的暂态谐波能量差可有效地判别区内故障和区外故障。

本文提出的区内、外故障判别判据对线路两端的通信有一定的要求, 直流输电系统实际运行中出现的故障信号传输延迟将会使区外故障时 $\Delta W(t) \neq 0$ 。因此, 为解决该问题, 实际运行中区

外故障判别判据为

$$\begin{cases} \Delta W(t) > \Delta W_{e_t}(t) & \text{区内故障} \\ \Delta W(t) < \Delta W_{e_t}(t) & \text{区外故障} \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\Delta W_{set}(t) = \max[\Delta W_{set1}(t), \Delta W_{set2}(t)] \quad (6)$$

$$\Delta W_{set1}(t) = k_{r1} \left[\left| \int_0^{\Delta t_d} u_{pre}(t) \cdot i_{pre}(t) dt \right| + \left| \int_0^{\Delta t_d} u_{nre}(t) \cdot i_{nre}(t) dt \right| \right] \quad (7)$$

$$\Delta W_{set2}(t) = k_{r1} \left[\left| \int_0^{\Delta t_d} u_{pie}(t) \cdot i_{pie}(t) dt \right| + \left| \int_0^{\Delta t_d} u_{nie}(t) \cdot i_{nie}(t) dt \right| \right] \quad (8)$$

式中: k_{r1} 为可靠系数; Δt_d 为延时时间, 对于 1 000 km 的直流输电线路, 其延时时间约为 4~5 ms; $u_{pre}(t)$ 、 $u_{pie}(t)$ 、 $u_{nre}(t)$ 和 $u_{nie}(t)$ 分别为区外双侧故障时正、负极整流侧和逆变侧“边界”上相应频段的暂态谐波电压; $i_{pre}(t)$ 、 $i_{pie}(t)$ 、 $i_{nre}(t)$ 和 $i_{nie}(t)$ 分别为区外双侧故障时流过正、负极整流侧和逆变侧“边界”相应频段的暂态谐波电流。

2.2 启动元件判据

理论上, 柔性直流输电系统正常运行时, 输电线路流过的电流为直流量; 且电阻型 SFCL 在正常状态下阻值 0 或呈现为很小的电阻值。因此, 正常运行时, 正极和负极整流侧“边界”上消耗的暂态谐波能量为: $W_{pr}(t)=0$ 且 $W_{nr}(t)=0$; 而发生故障时, $W_{pr}(t) \neq 0$ 或 $W_{nr}(t) \neq 0$ 。但是, 由文献[14]可知, 系统实际正常运行时, VSC 仍会输出一定的相应频段的谐波分量, 虽然数值较小, 但为了保证保护方案的准确启动, 本文予以考虑。所以在本文中启动元件的判据为

$$\begin{cases} W_{pr}(t) > W_{prset}(t) \text{ or } W_{pr}(t) < -W_{prset}(t) \\ \text{or} \\ W_{nr}(t) > W_{nrset}(t) \text{ or } W_{nr}(t) < -W_{nrset}(t) \end{cases} \quad (9)$$

当满足上述判据时, 保护启动; 否则保护不启动。其中:

$$W_{prset}(t) = k_{r2} \left| \int_0^T u_{prN}(t) \cdot i_{prN}(t) dt \right| \quad (10)$$

$$W_{nrset}(t) = k_{r2} \left| \int_0^T u_{nrN}(t) \cdot i_{nrN}(t) dt \right| \quad (11)$$

式中: k_{r2} 为可靠系数; T 为积分数据窗长度; $u_{prN}(t)$ 和 $u_{nrN}(t)$ 分别为正常运行时正极和负极线路整流侧“边界”上的相应频段的暂态谐波电压; $i_{prN}(t)$ 和 $i_{nrN}(t)$ 分别为正常运行时正极和负极线路整流侧“边界”上流过的相应频段的暂态谐波电流。本启动判

据仅使用整流侧“边界”的特征量, 故线路传输带来的延时问题并不会对其造成影响, 可靠性较高。

2.3 故障极的判据

对于双极性的柔性直流输电系统, 当发生故障时, 如何进行故障极的判别至关重要。定义故障极的选择判据为

$$K = \frac{|W_{pr}(t)|}{|W_{nr}(t)|} \quad (12)$$

式中: K 为故障选极系数; $W_{pr}(t)$ 为正极线路整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量; $W_{nr}(t)$ 为负极线路整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量。

由上文分析可知, 理论上发生故障的线路整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量大于零, 正常运行的线路整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量等于零。但是, 由于两极输电线路同杆并架, 在单极故障的暂态过程中, 线路之间的电磁耦合效应使正常运行的线路也会产生暂态谐波电压量和电流, 即: 正常运行的线路整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量并不为零; 且当发生双侧故障时, 由于双侧线路之间的电磁耦合, 使得 K 并不严格等于 1。

因此, 当发生正极故障时, $K > K_{set}$; 当发生负极故障时, $K < 1/K_{set}$; 当发生双侧故障时, $1/K_{set} \leq K \leq K_{set}$ 。 K_{set} 的取值与直流输电线路的参数、长度和谐波频段有关, 在我国现有的直流输电工程中, 耦合系数一般小于 0.5^[10], 故本文中 K_{set} 取 2, 即:

$$\begin{cases} \text{正极故障: } K > 2 \\ \text{负极故障: } K < 0.5 \\ \text{双极故障: } 0.5 \leq K \leq 2 \end{cases} \quad (13)$$

2.4 保护逻辑流程图

如图 5 所示, 柔性直流输电系统中的测量装置采集两极线路整流侧和逆变侧“边界”上的暂态电压和暂态电流, 进而获取两侧“边界”上特定频段的暂态谐波能量。当满足启动判据时, 则可认为系统发生故障, 然后通过区内、外故障判别判据以辨别区内、外故障, 当满足判据 $\Delta W > \Delta W_{set}$ 时, 则可确定为区内直流线路发生故障, 最后通过故障选极判据来进行故障极的选择, 选定故障极后发生故障信号, 使故障极两侧的保护装置动作。

3 保护方案相关问题

3.1 积分数据窗的选取

一般来说, 积分数据窗长度越大, 保护特征量表现出的特性越好, 即: 可以更为确切地进行保护的启动、区内外故障的辨别以及故障极的选择。但发生故障后, 由于柔性直流输电系统故障发展过程

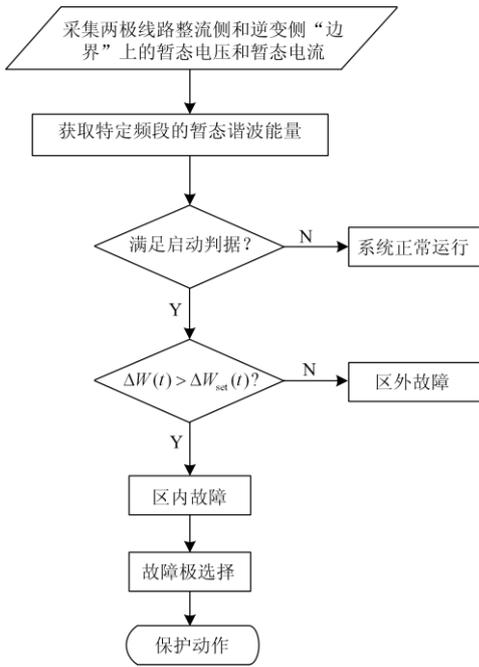


图 5 保护逻辑流程图

Fig. 5 Flowchart of the proposed protection

极快, 一般要求故障后 5 ms 左右就得完成保护动作和故障隔离整套动作, 因此留给保护的时间仅为 2~3 ms 左右, 故本文选取长度为 2 ms 的积分数据窗。

3.2 采样频率的要求

由于文中采用谐波分量的最高次数 $m=12$, 即: 利用频段为 50~600 Hz 的暂态谐波能量进行保护启动、区内故障识别以及故障选极。在工程中, 仅需 2 kHz 以上的采样频率即可保证能量提取的可信度。因此, 本保护方案对采样频率要求低, 易于实现。

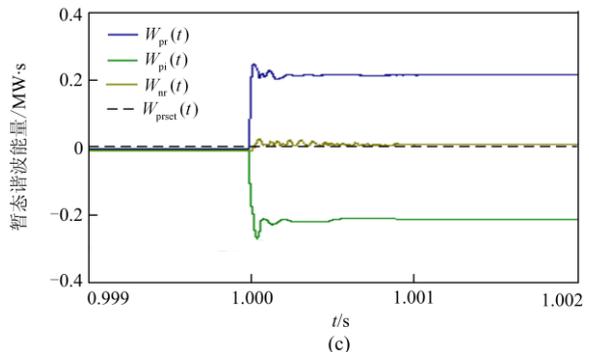
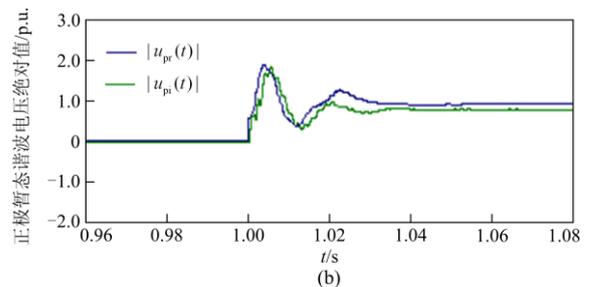
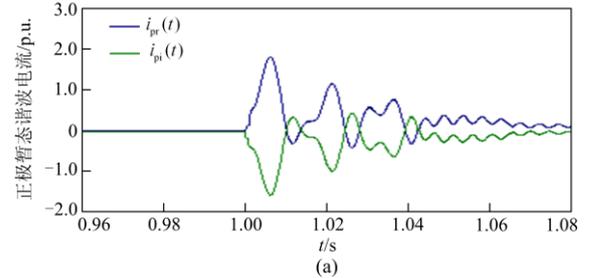
4 仿真实证

通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件建立基于 VSC 的双极性直流输电系统, 仿真模型如图 1 所示, 控制系统为双闭环串级 PI 控制器^[15]。直流输电系统的额定容量为 60 MW, 电压等级为 ± 60 kV, 并联电容均取 1 000 μF 。直流输电线路采用频变参数模型, 线路参数见文献[9], 全长 200 km。文中采用文献[16]的方法对电阻型 SFCL 建立模型。数据采样频率 10 kHz。故障发生时刻 $t=1.0$ s, 故障持续时间 80 ms。

仿真中, 可靠系数 $K_r=1.2$, 积分数据窗长度 $T=2$ ms, 延时时间 $\Delta t_d=0.8$ ms, 正极启动整定值 $W_{\text{prset}}(t)=0.016$ MW·s, 暂态谐波能量差整定值 $\Delta W_{\text{set}}=0.08$ MW·s。

4.1 区内故障仿真结果

直流输电线路中, 距离整流侧 100 km 处发生正极金属性接地故障 F1 时, 其所对应的仿真结果如图 6 所示。发生故障后 2 ms 内, 正极整流侧和逆变侧“边界”上流过的暂态谐波电流大小相等, 分别处于正半周波和负半周波; 两侧“边界”的暂态谐波电压绝对值基本上大小相等, 均处于正半周波。本文选取故障发生 2 ms 内的暂态谐波能量作为特征量, 即: 积分数据窗为 [1.000 s, 1.002 s]。图 6(c) 所示, 在上述积分时间窗内, 正极整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量大于启动值, 保护启动; 且两侧“边界”消耗的暂态谐波能量几乎大小相等, 符号相反。故暂态谐波能量差大于整定值(如图 6(d) 所示), 判别为区内直流线路故障。由图 6(c) 可知, 在积分数据窗 [1.000 s, 1.002 s] 内, 正极整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量为 0.225 MW·s, 负极整流侧“边界”消耗的暂态能量为 0.028 MW·s, 故障选极系数 $K=8.036 > 2$, 判定为正极故障, 实现故障的正确选极。



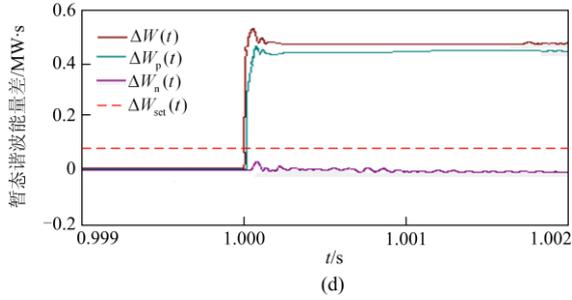


图 6 区内故障仿真结果

Fig. 6 Simulation results of internal fault

1) 过渡电阻的影响

直流输电线路故障时，过渡电阻的存在会减小故障特征量的数值，进而影响保护的灵敏性。为了验证本保护方案的抗过渡电阻能力，文中以正极输电线路中点发生经过渡电阻故障为例进行仿真，过渡电阻分别为 20 Ω、50 Ω、100 Ω、300 Ω。仿真结果如表 1 所示。

表 1 不同过渡电阻下的区内故障仿真结果

Table 1 Simulation results of internal fault under various fault resistances

过渡电阻/Ω	$W_{pr}(t)/(MW \cdot s)$	$\Delta W(t)/(MW \cdot s)$	K	结果
20	0.194	0.402	7.412	正常启动、 区内正极 故障
50	0.131	0.277	5.896	
100	0.081	0.178	4.385	
300	0.042	0.105	2.102	

由表 1 可知，正极整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量 $W_{pr}(t)$ 、两侧“边界”消耗的暂态谐波能量 $\Delta W(t)$ 及故障选极系数 K 的数值随着过渡电阻的增大而减小，在一定程度上降低了保护的灵敏性。但是，表 1 中上述数值均大于整定值，可以实现保护的正常启动、区内外故障的准确判别以及故障极的精确选择。因此，本保护方案具有较好的抗过渡电阻能力。

2) 故障位置的影响

表 2 给出了正极线路的不同位置发生金属性接地故障时所对应的仿真结果。表中的故障位置为故障点相对于整流侧的位置。由表 2 的仿真结果可以看出，故障位置的变化在一定程度上影响了正极整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量 $W_{pr}(t)$ 、正极逆变侧“边界”消耗的暂态谐波能量 $W_{pi}(t)$ 及故障选极系数 K 的大小，但上述特征量仍分别满足启动判据和选极判据；对于 $\Delta W(t)$ ，由于其是两极线路的整流侧和逆变侧“边界”消耗的暂态谐波能量之差，故几乎不受故障位置的影响。综上，本保护方案在区内不同的故障位置均可实现保护的快速、准确动作。

表 2 不同故障位置下的区内故障仿真结果

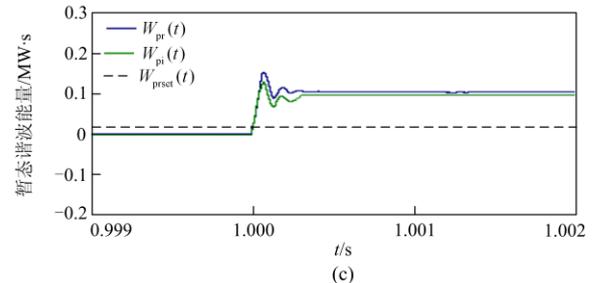
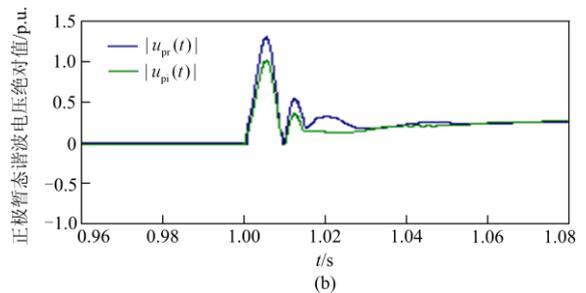
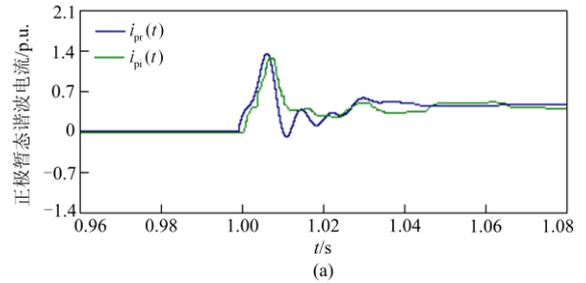
Table 2 Simulation results of internal fault under various fault locations

故障位置	$W_{pr}(t)/(MW \cdot s)$	$W_{pi}(t)/(MW \cdot s)$	$\Delta W(t)/(MW \cdot s)$	K	结果
首端	0.344	-0.118	0.481	9.971	
40 km 处	0.306	-0.152	0.477	9.488	正常
80 km 处	0.261	-0.193	0.475	8.316	启动、
120 km 处	0.207	-0.251	0.476	7.523	区内正
160 km 处	0.186	-0.272	0.478	6.865	极故障
末端	0.155	-0.306	0.480	6.461	

需要说明的是：区内负极故障或双极故障时，通过仿真结果可知，本文提出的保护方案同样可以准确有效地实现保护启动、区内故障判别以及故障选极。由于篇幅有限，此处不再详细呈现仿真结果。

4.2 区外直流侧故障仿真结果

图 7 给出了逆变侧区外发生正极金属性接地故障 F3 时的仿真结果，由图 7 可知，逆变侧区外故障时，在积分数据窗[1.000 s, 1.002 s]内，正极整流侧“边界”上消耗的暂态谐波能量均大于启动值，说明系统中存在故障，但由于两侧“边界”的消耗的暂态谐波能量基本上大小相等，符号相同，故二



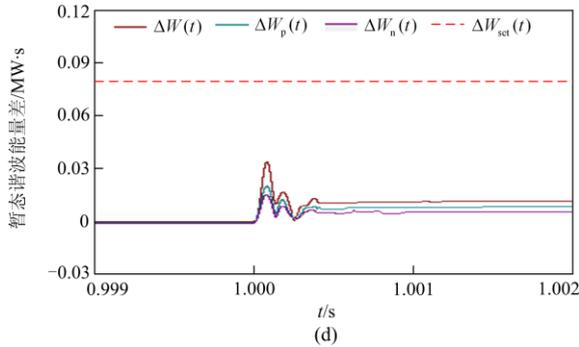


图 7 区外直流侧故障仿真结果

Fig. 7 Simulation results of DC external fault

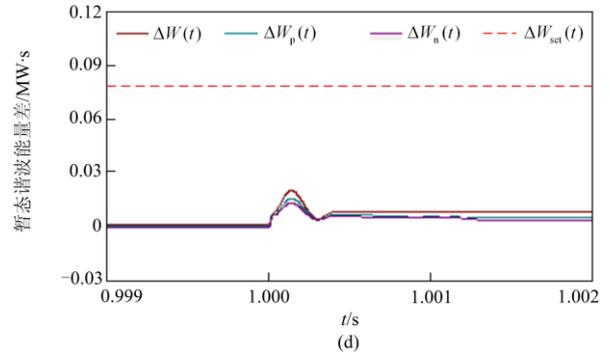


图 8 区外交流侧故障仿真结果

Fig. 8 Simulation results of AC external fault

者的暂态谐波能量差小于区内外故障判别整定值 ΔW_{set} , 判定为区外故障, 保护可靠不动作。

4.3 区外交流侧故障仿真结果

对于区外交流侧故障, 以逆变侧的区外交流母线接地故障为例进行分析, 当逆变侧发生区外交流母线接地故障 F5 时, 其所对应的仿真结果如图 8 所示。与上文 4.2 节一致, 在积分数据窗 [1.000 s, 1.002 s] 内, 两侧“边界”消耗的暂态谐波能量几乎大小相等, 符号相同, 二者的暂态谐波能量差小于设定的整定值, 因此, 判定为直流输电线路区外故障, 保护可靠不动作。

需要说明的是: 当输电线路逆变侧发生其他类型的区外直流故障, 以及输电线路整流侧发生区外故障时, 通过仿真结果可知, 本文提出保护方案同样可以实现区内外故障的有效判别, 使区外故障时保护不误动。由于篇幅有限, 此处不再详细呈现仿真结果。

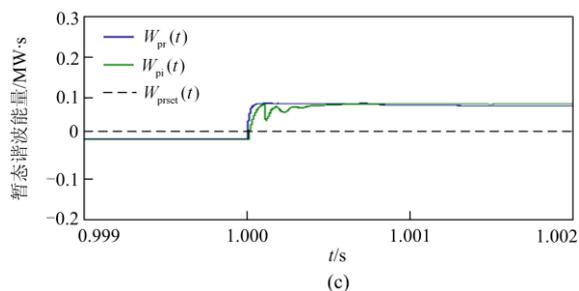
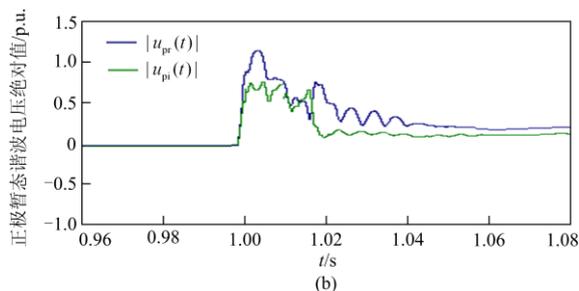
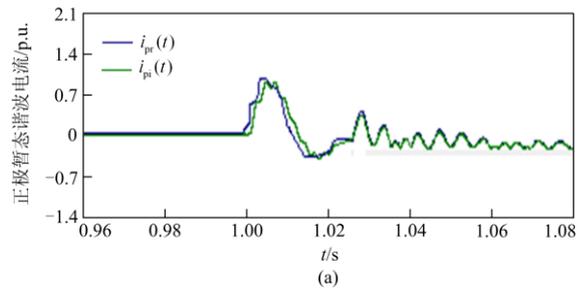
大量仿真结果表明: 区内故障时, 本保护方案可以在 5 ms 左右实现快速、准确动作, 几乎不受故障位置的影响, 且具有良好的抗过渡电阻能力; 区外故障时, 保护可靠不误动。

5 结论

本文通过对直流输电线路“边界”特性进行分析, 提出一种基于线路“边界”暂态谐波能量的新型保护方案, 即: 利用正极线路或负极线路整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量启动保护; 利用两侧“边界”消耗的暂态谐波能量差进行区内、外故障的判别; 利用正极线路和负极线路整流侧“边界”消耗的暂态谐波能量比进行故障选极。理论分析和大量的仿真结果表明: 本保护方案在各种故障情况均可以可靠、灵敏、快速地进行保护动作, 抗过渡电阻能力强, 且对采样频率要求低, 具有重要的工程应用价值。

参考文献

- [1] 张武其, 吕洋. 向弱电网供电的 VSC-HVDC 系统的模拟惯量控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 104-110.
ZHANG Wuqi, LÜ Yang. Emulation inertia control strategy for VSC-HVDC supplying weak network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 104-110.
- [2] 孙晓云, 高鑫, 刘延华. 柔性直流输电换流器故障特性分析及诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 75-84.



- SUN Xiaoyun, GAO Xin, LIU Yanhua. VSC fault characteristic analysis and diagnosis research of VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 75-84.
- [3] 张冰, 赵书强, 甄永赞. 柔性直流输电的改进行波保护仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 58-63.
- ZHANG Bing, ZHAO Shuqiang, ZHEN Yongzan. Simulation study of an improved traveling wave protection for VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 58-63.
- [4] 李斌, 何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 87-95.
- LI Bin, HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 87-95.
- [5] 刘剑, 郇能灵, 范春菊, 等. 柔性直流输电线路故障处理与保护技术评述[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 158-167.
- LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Comments on fault handling and protection technology for VSC-HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 158-167.
- [6] 靳幸福, 宋国兵, 徐海洋, 等. 利用模量模型识别的 VSC-HVDC 输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(10): 100-106.
- JIN Xingfu, SONG Guobing, XU Haiyang, et al. A novel pilot protection for VSC-HVDC transmission lines using modulus model identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10): 100-106.
- [7] 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.
- [8] 杨亚宇, 郇能灵, 刘剑, 等. 利用边界能量的高压直流线路纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5757-5767.
- YANG Yayu, TAI Nengling, LIU Jian, et al. A pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on boundary energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5757-5767.
- [9] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. VSC-HVDC 频变参数电缆线路电流差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 105-111.
- SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. A new current differential protection principle of VSC-HVDC considering frequency-dependent characteristic of cable line[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 105-111.
- [10] 张保会, 张嵩, 尤敏, 等. 高压直流线路单端暂态量保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 18-23.
- ZHANG Baohui, ZHANG Song, YOU Min, et al. Research on transient-based protection for HVDC lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 18-23.
- [11] SHI J, TANG Y J, CHEN L, et al. The application of active superconducting DC fault current limiter in hybrid AC/DC power supply systems[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, 18(2): 672-675.
- [12] 叶林, 林良真. 超导故障限流器在电力系统中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 1-4, 8.
- YE Lin, LIN Liangzhen. Superconducting fault current limiter applications in electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 1-4, 8.
- [13] 刘可真. 特高压直流输电线路暂态保护和故障测距问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- LIU Kezhen. Research on transient protection and fault location for ultra-high voltage direct current transmission line[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [14] 宋国兵, 褚旭, 高淑萍, 等. 利用滤波器支路电流的高压直流输电线路全线速动保护[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 120-126.
- SONG Guobing, CHU Xu, GAO Shuping, et al. A whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end current of DC-filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 120-126.
- [15] 陈海荣. 交流系统故障时 VSC-HVDC 系统的控制与保护策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- CHEN Hairong. Control and protection of VSC based HVDC system under AC system fault conditions[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [16] 李晶, 王龙, 宋萌, 等. 基于 PSCAD 的 RSFCL 建模方法研究[J]. 电子设计工程, 2013, 21(21): 110-113.
- LI Jing, WANG Long, SONG Meng, et al. Study of RSFCL modelling method based on PSCAD[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(21): 110-113.

收稿日期: 2017-09-19; 修回日期: 2017-12-03

作者简介:

谢志远(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流电网保护; E-mail: xiezhiyuanzy@163.com

刘鑫蕊(1981—), 女, 工学博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护。

(编辑 葛艳娜)