

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221729

## 主动探测式保护关键技术概述及展望

陈福锋<sup>1,2</sup>, 杨黎明<sup>2</sup>, 宋国兵<sup>3</sup>, 陈中<sup>1</sup>, 薛明军<sup>2</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 211100;  
3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 以新能源为主体的新型电力系统中广泛应用的电力电子设备引入了新的故障特征, 对继电保护性能提出了更高的要求, 传统继电保护技术难以适用。主动探测式保护利用可控的电力电子设备生成特定的探测信号, 引入了更为清晰明确的故障特征, 可以构造更为简便、灵敏、可靠的保护新原理。基于扰动的故障分析方法为主动探测式保护提供了理论基础, 电力电子技术的发展为主动探测式保护提供了应用基础。针对主动探测式保护的具体实现方案, 详细分析了探测信号的选择、生成、注入时机和处理等关键技术, 归纳整理了主动探测式保护在直流系统和新能源发电等典型场景下的应用。对未来的研究方向和工程实践中可能遇到的问题进行了总结评述, 期望能为主动探测式保护的深入研究提供参考。

**关键词:** 主动探测; 继电保护; 故障特征; 电力电子; 新能源

### Overview and prospect of key technologies for active detection protection

CHEN Fufeng<sup>1,2</sup>, YANG Liming<sup>2</sup>, SONG Guobing<sup>3</sup>, CHEN Zhong<sup>1</sup>, XUE Mingjun<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Power electronic equipment widely used in the new power system with renewable energy as the main body has introduced new fault characteristics and raised higher requirements for the performance of protective relaying. Traditional protective relaying technology is not sufficient. Active detection protection uses controllable power electronic equipment to generate specific detection signals, and introduces clearer fault characteristics, from which one can construct more simple, sensitive, and reliable protection principles. The disturbance-based fault analysis method provides a theoretical basis for active detection protection, and the development of power electronic technology provides an application basis for active detection protection. For a specific implementation scheme of active detection protection, the key technologies of detection signal selection, generation, injection timing and processing are analyzed in detail, and the applications of active detection protection in typical scenarios such as a DC system and renewable energy power generation are summarized. Future research directions and possible problems in engineering practice are summarized and commented on, and it is expected that this will provide a reference for further research on active detection protection.

This work is supported by the International Cooperation and Exchange Program of National Natural Science Foundation of China (No. 52061635105).

**Key words:** active detection; protective relaying; fault characteristics; power electronics; renewable energy

## 0 引言

“双碳”国家战略目标在电力行业中的实践是构建以新能源为主体的新型电力系统<sup>[1]</sup>。高比例可

再生能源接入和高比例电力电子设备在电力系统中的应用给继电保护工作带来了新挑战, 需要研究新形势下电网的故障特征, 分析其对现有保护算法和装备的影响, 并提出相应的继电保护新方案<sup>[2]</sup>。

一方面, 新型电力系统是一个高度电力电子化的网络, “源网荷储”等环节都会引入大量变流器设备<sup>[3]</sup>。与传统电力元件相比, 变流器具有脆弱性和

基金项目: 国家自然科学基金国际合作与交流项目资助 (52061635105)

可控性两个显著特征。变流器的脆弱性意味着其不能长时间承受较大的故障电流，因此需要继电保护在更短的时间内可靠隔离故障。由于电力电子设备本身具有快速调节能力，故障后会采取限流措施以实现自保，因此不能提供显著的故障电流，影响了继电保护识别故障的灵敏度，也影响了故障识别的可靠性。变流器在电网故障过程中的调制作用，也会产生与传统同步发电机作为电源、铁磁式变压器作为电网耦合元件的传统电网完全不同的故障特征，影响了传统保护原理的适用性。此外，由于现代电力系统控制与保护动作的时间在同一尺度上，被迫需要考虑保护与控制系统的配合问题。

另一方面，电网双高特性也为继电保护的发展带来了新思路<sup>[4]</sup>。电力系统发生故障后，传统继电保护方案是通过被动检测系统对故障的响应来判别故障位置及其严重程度。而现代电力系统中有大量的电力电子设备，可以利用其可控性，在故障发生后的特定阶段内，按照预定规则主动向电力系统注入特征信号，故障位置不同，电力系统对探测信号的响应特征也将会不同。通过研究电力系统对探测信号的响应情况，可以构造新的保护原理，实现新的保护方案。

探测式保护思想已应用于一些传统方法难以处理的领域，例如小电流接地选线<sup>[5-7]</sup>、电缆故障定位<sup>[8-10]</sup>和发电机定子故障识别<sup>[11-14]</sup>等。其中小电流接地选线的S注入法是经典的应用场景，其基本原理是，当配网发生接地故障后，将特定频率的交流电流信号通过三相电压互感器的中性点注入到接地线路中，利用信号检测仪对各条馈线进行检测，检测到注入信号的线路即为故障线路。相关学者对S注入法进行了大量研究，文献[15]提出利用方波注入信号的响应特性抑制对地分布电容的影响，文献[16-17]根据直流注入信号的传播路径设计故障选线方案，文献[18-20]解决了接地点伴随不稳定间歇性电弧时注入信号不连续的问题。上述方案需要使用额外的功率信号注入设备，增加了工程实现的成本和难度。随着新型电力系统的快速发展，电网引入了越来越多的可控电力电子设备，为主动探测式保护的发展奠定了良好的基础。

本文介绍了主动探测式保护的基本理论和应用基础，阐述了双高电网继电保护需要应对的问题，总结了传统探测式保护的应用。然后分析了探测信号的选择、生成和处理等关键技术问题，研究了主动探测式保护的典型应用场景，探索了未来的研究方向，并展望了未来的应用前景。

## 1 主动探测式保护概述

### 1.1 基本理论

电力系统发生故障时，相当于在故障点给系统加了扰动，系统中的各个元件都会对此扰动做出反应，传统继电保护通过对保护安装处的电气量进行测量，提取和分析系统在正常运行和故障状态下的差异，构造判据区分正常和故障元件。

本文探讨的探测式保护利用当前电力系统电压电流灵活可控的特点，在无需额外增加能量注入装置的前提下，通过设计特定的附加控制策略，使用系统中既有的电力电子装置在故障期间向系统注入特征明显的电气信号，根据系统对注入信号的响应进行故障识别<sup>[2]</sup>。

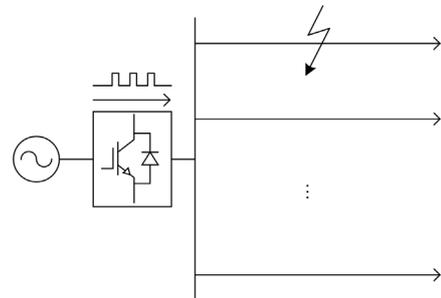


图1 主动探测式保护方案

Fig. 1 Active detection protection scheme

传统检测式保护的扰动源来自于故障，而主动探测式保护的扰动源来自于变流器设备的主动生成，这是两者的核心区别。从这个角度看，探测式保护可以只是一个技术方案，很多已被证明有效的保护原理仍然可以沿用。不同于故障引起的扰动的随机性，探测式保护的扰动是主动发出的可控信号，可根据所采用的原理和算法的特殊性，设计传统保护实践中不存在的特定扰动，降低故障特征识别的难度，设计更为简单、灵敏和可靠的保护新原理。因此，探测式保护原理只是改变了扰动信号的来源，对于系统固有的响应特征完全没有影响，从理论上来说是完全可行的。

### 1.2 应用基础

经过数十年的发展，功率半导体器件在大功率、耐高压、耐高温、高频和低损耗等方面都得到了长足的发展<sup>[3]</sup>，促使各种新型大功率电力电子装置在电力系统的各个环节都得到了成功的应用，其中以直流输电、柔性交流输电和电力电子变压器最为典型<sup>[21-22]</sup>。这些可控的电力电子装备都可以作为主动探测式保护的信号注入源。

高压直流输电和柔性直流输电系统两侧的换

流站都可以作为信号注入源。柔性直流输电的可控性更好, 可以生成更为理想的探测信号, 但是对于保护的速动性和选择性要求也更为苛刻, 需要根据实际需求确定探测式保护方案。

可控串补(TCSC)、静止同步并联补偿器(STATCOM)和统一潮流控制器(UPFC)等柔性交流输电设备(FACTS), 虽然功能各异, 控制策略和对系统的影响方式也不同, 但是都可以实现对系统特定参数的调节。高可控性也是 FACTS 器件未来的发展方向, 能够为主动探测式保护的设计提供更好的支持。

电力电子变压器以电力电子技术为核心, 在电力系统中通过变流器和高频变压器实现电压转换和能量传递控制, 是对传统工频变压器的替代和升级<sup>[23]</sup>。电力电子变压器得到大规模应用后, 其作为系统中关键的电能节点, 连接系统中的线路、母线和电抗器等设备。这些与电力电子变压器相连的设备发生故障后, 可以在电力电子变压器的控制策略中引入附加控制, 使电力电子变压器向系统中注入探测信号, 为这些设备的主动探测式保护提供支持。

由以上分析可知, 随着新型电力系统的发展, 电网中可作为注入源的电力电子设备越来越多, 探测式保护的应用将越来越具有工程价值和实践基础。

### 1.3 应对的问题

高比例可再生能源的接入和高比例电力电子设备的应用, 使得现代电力系统在发生故障时呈现出新的特征, 传统继电保护也因此正面临着新的挑战, 主要包括以下两个方面。

#### 1.3.1 故障电流受限

功率电子器件作为电力电子设备的核心, 近年来其在实现更高击穿电压、更低导通电阻和更高开关速度等方面都有了很大进展<sup>[21,24]</sup>, 但是相较于变压器、电抗器和线路等同电压等级的铁磁型元件, 电力电子设备承受大电流或高电压的能力仍然较弱<sup>[3]</sup>。从电力系统继电保护的视角出发, 电力电子设备的脆弱性主要表现在 3 个方面: (1) 承受的电流峰值较低; (2) 承受大电流的时间较短; (3) 承受冲击电流的能力较弱。

在故障发生后, 控制系统需要将故障电流限制在功率器件可承受的峰值电流以下。以光伏发电系统为例, 逆变器的电流饱和限值一般只有额定电流的 1.2~1.5 倍<sup>[25]</sup>, 当光伏发电系统联络线上任意位置发生故障时, 全线的电流并未有明显差别, 导致过电流保护灵敏度低且难以配合。

当附近的电力元件发生故障时, 电力电子器件也将流过较大的电流, 为避免被烧毁, 电力电子器

件将会在极短时间内闭锁。但是, 这样就会扩大停电范围, 造成不必要的损失。为了避免这类情况发生, 就要求继电保护以更快的速度和更高的选择性来隔离故障<sup>[26-27]</sup>。

相对于传统元件, 电力电子器件造价高昂且易损坏, 难以承受冲击性电流。对于永久性故障, 传统的重合闸方案将会对系统造成二次冲击, 增加对电力电子设备的损害<sup>[28-29]</sup>。因此, 含高比例电力电子设备的电网对可靠的瞬时/永久故障识别方案的需求更为迫切。

#### 1.3.2 非线性时变系统

电力电子器件的高灵活可控性, 使得现代电力系统在面临系统和外部环境变化时, 能够迅速且有效地采取应对措施<sup>[30]</sup>。在系统发生故障的过程中, 电力电子设备快速调节, 等效电路呈现非线性时变特性, 使得系统故障过程更加复杂多变, 影响传统保护的适应性。

在电力系统故障期间, 电力电子设备的控制系统与一次系统相互作用, 很难建立一个简单可用的线性等效电路模型<sup>[31-34]</sup>。这使得传统的以故障分析法为基础的一类保护算法在面对变流器元件时, 难以进行有效的电路分析<sup>[35-36]</sup>。

电力系统中的电力电子器件不断导通和关断, 生成给定的电压电流。在系统稳态运行时, 可以将此过程视为一个准稳态过程, 采用线性时不变理论进行分析。而在故障过程中, 电力电子设备快速调节, 对应的等效电路不断变化, 是一个典型的时变系统<sup>[37-38]</sup>。

由于暂态过程中系统的状态不断发生变化, 此时工频相量计算都是基于跨窗数据的结果, 只有形式上的数学意义, 缺乏实际物理意义, 以此为基础的传统工频量保护的有效性有待验证<sup>[39-40]</sup>。

由于变流器调节控制的作用, 故障前后变流器的等效电路模型发生了变化, 破坏了传统保护中常用的故障分量法的应用基础<sup>[41-43]</sup>。此时要想借用故障分量法, 则必须认为在故障时变流器处也存在一个新增的故障源, 这将增加电路分析的复杂性。

综上所述, 电力电子器件的脆弱性要求新型电力系统的继电保护能够更快、更准确地切除故障, 而新能源故障电流受限的特征却降低了继电保护的灵敏度和可靠性, 这是一个亟待解决的矛盾。同时, 新能源电源故障穿越期间的快速调节特征及其阻抗的时变特征, 又破坏了继电保护原理的理论基础, 相应的保护方案出现了适应性问题。但是, 若能充分利用现代电力系统中电力电子设备灵活可控的特性, 通过其主动向电网中加入稳定可靠且特征明显

的电气信号构造探测式保护，将有望解决高比例新能源和高比例电力电子设备引入电力系统带来的继电保护问题。

探测式保护的实现理论上不存在问题，工程应用基础也已经具备，并且已有了少量的实践经验。如果能够充分利用现代电力系统中大量存在的可控元件，构造出特定的探测信号，用以协调配合保护装置的故障识别，主动探测式保护技术将可以在新型电力系统中发挥更大的应用价值。

## 2 关键技术

### 2.1 探测信号的选择

探测式保护首先需要解决的是如何选择合适的探测信号，包括信号的形状、频率、幅值和持续时间等问题。在工程实践中，一方面要考虑保护装置采用的具体保护算法，另一方面也要考虑变流器自身的输出能力。

适用于探测式保护的原理主要可以分为两大类，一类基于参数识别的算法，另一类基于行波的算法。

基于参数识别的算法通常采用正弦波作为探测信号，可以是特定的谐波或非整次谐波。在此频率下对系统进行电路分析时，基于正弦相量的电路分析物理意义明确，数学表达简洁，可以构造类似于传统保护的算法。

基于行波的算法通常采用脉冲信号作为探测信号。传统行波保护波头识别的可靠性一直是制约其应用的一个关键问题。而采用探测式保护可以连续注入多个窄脉冲，确保保护装置能够可靠检测到行波波头。

不同电力电子设备输出的电压电流频率有上限。基于参数识别的算法通常不会采用过高的频率进行计算，因此不会达到变流器的频率输出上限。而基于行波的算法，其脉冲的发射脉宽将受到器件开关频率的限制。除上限频率外，还应注意一些特定频率。在高压直流系统换流站或其他电力电子设备附近通常会设计滤波电路，补偿掉换流站产生的谐波。这些滤波器是针对系统正常运行状态设计的，可以滤掉特定频率的谐波。探测信号的设计应避免这些特定频率。在分析系统的响应时也应考虑滤波电路对某些频点的放大或缩小作用。此外，探测信号的频率设置也要考虑继电保护装置的硬件限制，信号采样频率越高，对装置硬件的设计要求也越高，需要综合考虑设备的性能和可靠性。

变流器输出信号的幅值也需要综合考虑。一方面输出信号应保证保护装置能够可靠有效地接收到注入信号的信息。考虑到信号在传播过程中的畸变

和耗散以及保护采样和计算的精度，输出信号的幅值应尽可能大。另一方面为了减少对系统的干扰和冲击，降低变流器模块承受的过电压过电流负担，则要求输出信号的幅值应尽可能小。在实际设计中，既要充分保证保护装置精确的工作电压和电流，又要尽量减少注入信号对系统的影响。

文献[44]基于参数识别的算法进行直流配电网故障识别，考虑到电力电子设备的生成能力和所研究线路的谐振频率，选用 180 Hz 的谐波作为探测信号，幅值选为额定电压的 2.5%，既能满足互感器测量精度的要求，又不影响系统的正常运行。

在传统保护中，变流器设备被动响应系统的故障，表现出非线性时变特性，导致对其建模和分析变得困难。而在主动探测式保护中，变流器根据需要在控制系统的帮助下生成指定的探测信号，可以被视为特性已知的激励源。在变流器能力范围内，应根据保护算法的需要，设计尽可能简单易用的探测信号。

### 2.2 探测信号的生成

在电力系统中，电力电子设备的控制系统已经十分成熟，根据运行状态的不同，可采用不同类型的控制策略。以用于柔直的 MMC 为例，其控制策略包括正常工况下的控制策略、不对称桥臂阻抗下的控制策略和不对称交流电网下的控制策略<sup>[45]</sup>。电力系统中常用的电力电子设备控制方案如图 2 所示。

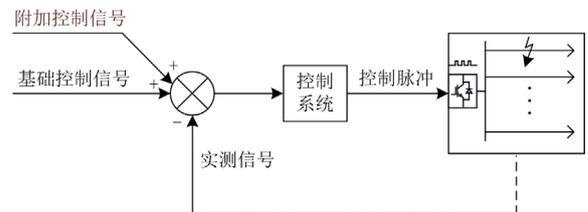


图 2 电力电子设备典型控制方案

Fig. 2 Typical control scheme of power electronic equipment

如图 2 所示，在典型的控制方案中，参考信号与实际测量信号作比较后作为输入给到控制系统，控制系统生成控制脉冲，发送给电力电子设备。实际应用中通常采用双闭环控制策略，外环为功率环或电压环，内环为电流环，控制器采用 PI 调节器。

构造主动探测式保护需要设计附加控制回路，当电力系统正常运行时，此附加控制回路退出。当电力系统发生故障时，附加控制回路投入，将预先设计的保护所需的控制信号加到参考信号中，控制电力电子设备输出特定的注入信号。由于控制系统的响应速度快于绝大部分现有的保护<sup>[46]</sup>，使得控制系统和继电保护协调配合成为可能。电力系统对注

入的探测信号做出响应后, 在保护安装处测量电压电流, 提取电力系统对探测信号的响应特征, 即可构造探测式保护。

### 2.3 注入信号的时机

现代电力系统复杂多样, 不同区域、不同元件对于保护速动性、选择性、可靠性和灵敏性的需求各不相同。因此, 主动探测式保护应该结合具体的保护需求设计合理的信号注入时机。

对于主保护, 应该考虑无延时的信号注入, 以保证快速可靠切除故障元件。探测信号生成的基本流程如下: 系统发生故障后, 保护启动元件检测到故障向控制系统发出请求信号, 控制系统通过改变控制目标控制变流器生成探测信号。减少信号注入的时间可以从以下 3 个方面入手。首先, 保护装置的启动元件已经非常成熟, 可提升的空间不大。其次, 可以将保护装置与控制装置设计在同一个屏柜中以降低物理上的距离, 减小保护装置与控制系统的通信时间。甚至可以考虑在一台装置中实现保护和控制功能, 简化通信方式提高通信效率。最后, 需要考虑降低变流器生成探测信号的时间。一方面要提高控制系统的响应速度, 另一方面在满足算法需求的前提下, 设计尽可能简单的探测信号降低探测信号的跟踪难度。以文献[47]为例, 其构造的柔性直流纵联保护需要快速动作, 因此在故障发生数毫秒后注入短时的(窗长只有 10 ms)简单的(频率 100 Hz, 幅值 0.1 倍额定电压)正弦波。

对于后备保护, 其速动性要求不高, 在一些情况下可以考虑躲过故障初始的暂态过程, 即在故障自身产生的暂态电流电压衰减至较小值时注入探测信号。此时探测信号与系统自身信号具有较大的区分度, 更有利于探测信号的提取和处理, 进而提高后备保护的灵敏性和可靠性。

系统恢复、瞬时/永久故障判别对注入时机的要求更为宽松。在保护跳闸或开关确认跳开后, 给故障电弧熄灭预留一定的时间, 在此期间可以进行信号注入。文献[48]提出的自适应重合闸方案, 在跳闸 250 ms 后才开始探测信号注入操作。

### 2.4 探测信号的处理

由于探测信号具有天然的“故障分量特性”, 相对于传统保护, 在主动探测式保护方案中, 基于参数识别的算法在信号处理上更为简洁有效。

故障分量法不能直接应用于含电力电子设备的系统。实际上, 即使应用于传统系统, 由于在电压电流计算时需要减去故障前的分量, 考虑到系统频率存在偏差, 故障分量法只能计算故障后 20~40 ms 内的数据, 极大地限制了故障分量的应用<sup>[49]</sup>。

而主动探测式保护生成的探测信号是故障之后才产生的, 不需要减去故障前的分量, 这种特性与系统中的零序分量和负序分量类似, 在分析计算时十分简便。在生成探测信号时, 只要与系统中本来就存在的工频信号做一个明显的区分, 即不选择工频信号或工频附近的信号, 在信号提取时就会十分方便。由于探测信号已知且可控, 在信号处理使用滤波器时可以做针对性的设计。在算法设计上, 利用变流器生成特定的谐波或者序分量, 可以针对性地解决一些特殊问题。

另外, 在传统保护中, 参数识别算法面临着一个问题: 故障中的暂态量或者高次谐波量中含有大量的故障信息, 可以列写方程进行参数计算, 但是大部分的暂态量只在故障初期很短一段时间内存在, 然后迅速衰减为零。这会导致关于暂态量的方程变为病态方程, 使得识别得到的参数误差很大甚至出现错误。而探测式保护可以利用变流器生成稳定的谐波以进行参数计算, 从而避免上述情况的发生。

对于基于行波的算法, 主动探测式保护的信号识别和提取相较于传统行波算法更为容易。传统行波算法提取故障点向周围系统传播的行波, 其波形特性与系统结构、元件参数和故障时刻等因素相关, 具有很大的不确定性。而探测式保护生成的探测信号是主动生成的, 其波形稳定可控, 结合对系统的分析, 保护装置接收到的波形可以预期, 对于行波的提取和分析也会更加稳定有效。传统的基于波头分析的一些算法<sup>[50-51]</sup>也可以设计得更为简便。

## 3 应用场景

如果被保护元件与可控电力电子设备之间的电气距离较近, 即被保护元件能够对探测信号做出响应, 则可以考虑构造探测式保护方案。几个典型的应用场景探讨如下。

### 3.1 直流系统

直流系统对保护的速动性和可靠性都有较为严苛的要求, 并且具备主动探测式保护所需的可控变流器, 是一种典型的应用场景。

与交流配网小电流接地系统类似, 为提高直流配网的供电可靠性, 通常采用经“钳位电阻”接地。但是当系统发生接地故障时, 会因故障电流过小而无法可靠识别。文献[44]提出了一种基于探测信号注入的接地故障识别方案, 在 MMC 的控制策略中引入附加控制, 在故障时注入正弦信号, 为故障分析提供了稳定可靠的电气特征。基于模式识别的思想, 利用等效零模阻抗在故障和非故障下感性容性

的不同,设计了故障识别方案。直流系统中本身没有稳定可用的正弦信号,但可以利用 MMC 可控元件主动向系统注入特定的正弦信号,人为构造故障特征信号。

文献[52]对故障控制策略进行分析,结合快速隔离开关,利用时序逻辑实现了故障隔离。文献[53]在系统故障时改变变流器调制频率,使系统中出现相同的特征频率,保护装置检测和计算这个频率的特性,可以构造直流线路保护。文献[47]基于模式识别的思想,根据两端探测信号在区外故障和区内故障时是否满足电容模型,构造保护判据,设计了适用于柔性直流线路的主动探测式保护方案。

### 3.2 新能源发电系统

风电、光伏等新能源发电系统通常采用变流器与大系统相连接。其送出线上的故障特征与传统保护有显著差异,导致传统的选相和方向元件出现错误、差动保护的灵敏度不足等。利用连接点处的可控变流器构造探测式保护方案可以应对这些问题。

对于光伏发电系统,文献[54]通过控制逆变器在系统低穿期间主动向电网施加短窗谐波扰动,加强距离保护对送出线路故障的侦测能力,确保场站侧保护快速动作。文献[55]设计 DC/DC 升压变换器故障控制器,在其闭锁后向故障点提供小功率的故障电流,利用电流方向元件实现馈线单端量保护。文献[56]考虑谐波扰动传播的特性,改变直流变压器的载波频率,对汇集系统施加谐波扰动,根据谐波传播路径实现故障区域判别。

### 3.3 线路故障测距

传统的注入式电缆测距方案需要额外的注入装置,设备和人工成本都比较高。当线路或电缆有相邻的可控电力电子设备时,可以采用本文所述的主动探测式技术简化测距方案,该技术可以提高测距的效率。

接地极故障测距是注入式故障测距的一个典型应用。双极直流系统的接地极需要埋在离换流站较远的地方。当系统双极平衡运行时,如果接地极发生故障,接地极上几乎没有故障电流,因此没有可用的电气量可供测距。针对这个问题,文献[57-58]分别采用基于参数识别和基于行波算法的主动探测式保护方案,其基本思路是利用控制系统临时打破双极间的平衡状态,使接地极上出现可测量的电气量,通过参数识别分析或者行波分析,实现故障定位。

### 3.4 线路重合闸

电力电子设备应对冲击电流的能力较弱,迫切需要准确识别瞬时/永久性故障。基于主动探测式保

护的思想,向系统中注入探测信号,利用瞬时性与永久性故障线路对注入信号的响应特征的差异,实现故障性质判别。相对于前述应用场景,重合闸判别时故障线路已被切除,需要考虑探测信号通路。

当直流断路器断开时,其换流支路是隔绝直流的,但是可以导通交流,利用这个特性,文献[59]向系统中注入交流信号,在不影响系统运行的情况下实现了瞬时/永久故障判别。类似地,文献[60]提出了一种适用于全桥 MMC 的主动注入式自适应重合闸方案。文献[61]基于线间电容和电感的耦合特性,向直流线路健全线路注入探测信号,分析故障线路上的耦合信号,利用其在瞬时和永久故障时的传播特性不同构造了自适应重合闸判据。文献[48]分析了风电场送出线三相跳闸后的情况,先将其中一台风机短时投入系统向送出线放电,利用电流积分特性构造保护判据。该方案利用了风电场风机的分布式特点,只利用一台风机就完成了探测,且最大限度地减少了对整个系统的冲击。

### 3.5 特殊应用场景

除了上文介绍的一些典型应用场景,主动探测式保护在一些特殊场景的探索也值得关注。

对于电缆线路,其在发生一些故障之前往往会出现电缆老化等早期故障,如果能够提前识别和隔离早期故障,则能防止其发展成为更为严重的故障。不过早期故障时电缆只有微弱的电压电流特征,难以采用常规方法识别。文献[62]提出了基于转移电阻系数的故障识别和定位方法,通过改变控制策略,在直流轴注入扰动,通过增强故障特征以实现电缆故障的早期识别。

本文研究的注入式方法是向系统注入额外的电压电流,而文献[28]在研究配电线路重合闸时给出了一种“限流试探法”,与本文所述的探测式保护的思路有相似之处。为避免对系统产生较大冲击,可以在重合回路上加入限流电阻。重合后检测电流,如果电流较小,说明故障已消失,此时可以旁路掉限流电阻;如果电流较大,说明是永久性故障,此时应该加速断开回路。探测式保护是在故障时临时向系统“注入特定电气信号”,而限流试探法是在故障期间临时向系统“嵌入特定阻抗”,本质是向电力系统引入新的“能控能观”量,通过为保护判断提供额外信息,从而提高保护的判断能力。

## 4 研究展望

### 4.1 主动探测的启动方式

主动探测式保护对故障的响应方式仍然是被动的,在系统发生故障或扰动后,才会向系统注入

信号。因此, 需要通过启动元件判断附近电力系统是否发生了故障, 以决定是否向系统注入探测信号。

可选的启动方式如图 3 所示, 包括保护装置启动和变流器启动两种方案。方案一将启动元件置于保护装置中, 在系统发生故障后, 利用保护装置启动元件检测到系统扰动后, 向控制系统发出请求信号, 控制系统通过改变控制目标, 控制变流器生成探测信号。方案二将启动元件置于变流器控制系统中, 直接在控制系统中利用检测到的电压电流构造启动判据, 并进行后续的探测信号生成。

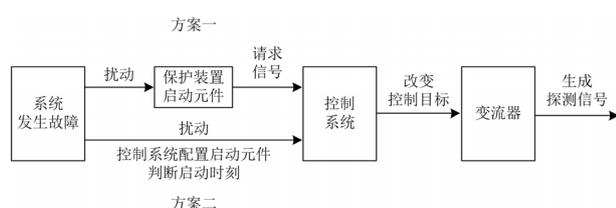


图 3 主动探测启动方案

Fig. 3 Starting scheme of active detection

方案一的优势在于保护装置中已有成熟的故障启动元件, 易于实现, 对变流器控制系统的改动需求更小; 方案二的优势在于减少了通信环节, 能够更快的响应故障。在主动探测式保护技术应用的初期, 建议采用方案一, 能够降低变流器控制系统与保护装置的配合难度, 有利于方案的推广; 而在主动探测式保护技术广泛应用后, 建议采用方案二, 节省中间环节, 降低保护系统整体复杂度, 提高保护响应速度。

#### 4.2 变流器的信号注入能力

主动探测式保护依赖于变流器的信号注入能力, 实现方式因一次系统而异。如果被保护元件附近有大功率可控设备(如换流站), 则可直接利用此设备实现信号注入。如果附近为光伏电站、风电场等分布式电源, 单个光伏或风机变流器的功率不一定能满足需求, 则需多个变流器协同配合。差动保护算法本身就需要在双端注入探测信号<sup>[63]</sup>, 同样依赖多个变流器协同配合。配合方法包括通信和无通信等方式, 具体有待进一步研究。

储能装置自带稳定的电源支撑, 可控性好、响应速度快, 是优良的信号注入设备, 其在电力系统中的逐步推广应用能够大大降低主动探测式保护的设计和应用难度。

#### 4.3 附加控制策略设计

主动探测式保护依赖于电力电子设备控制系统的密切配合, 需要在原有的基础控制策略上叠加一个合理的附加控制策略。附加控制策略一方面要

使得电力电子设备生成所需的探测信号, 另一方面应尽可能地降低对原始控制系统的干扰。在基础控制系统和附加控制系统中加入前置滤波器是一种比较直接的方案, 但是会增加控制系统的时延。附加控制策略也可以根据具体控制系统的点, 设计与基础控制系统正交的附加控制信号, 但是这种方式得到的控制策略适用的应用场景会受限。

附加控制策略也需要考虑降低对一次系统的影响和冲击, 生成的谐波和脉冲应符合所在电网对电能质量的要求。由于附加控制策略只存在于电网故障或扰动后很短的一段时间内, 通常情况下对电能质量的改变不大。

此外, 合理的附加控制策略可以使电网更快地从系统扰动中恢复。针对光伏系统在遇到交流电压浪涌后难以回到原始的最大功率点的问题, 文献[64]提出通过修改光伏逆变器的负序电流基准, 主动向系统注入二次谐波, 监测直流电压二次谐波分量的幅度, 在无需额外通信的情况下及时切换回原始的 MPPT 控制。

#### 4.4 常规保护应用场景分析

电力电子设备在电力系统中的广泛应用是未来的必然趋势, 对电网施加控制的手段必然越来越多, 探测式保护的应用也将拓展至更为常规的场景。

目前的交流系统中存在大量的可控设备, 可以探索在可控变流器附近其他元件的探测式保护应用。线路两侧安装的可控高抗投切时会对线路电压电流产生扰动, 利用此扰动构造线路保护, 有望解决线路末端故障判别、双回线误动和距离保护范围缩小等问题。可控高抗的特别之处在于, 故障发生时本身需要可控高抗的投切<sup>[65]</sup>, 因此不需要为探测式保护做额外的信号注入, 也就不会给系统引入新的扰动, 但是需要注意此方案对扰动信号控制的自由度将会降低。

为了防止电力电子器件受到过大故障电流的损害, 各类可控的柔性限流器越来越多地应用于中低压直流电网。限流器起作用时故障发生, 此时在限流器控制中加入探测信号, 或者直接控制其输出波形幅值相位和频率, 这些受控的电气信号可以配合进行保护计算。

近年来, 储能装置也有较大发展, 典型的储能装置通过可控变流器与电力系统相连, 因此可以将其作为主动探测信号的发射源。对于探测式保护, 储能装置的优势在于其能量直接来源于自身, 在故障发生的较短时间内无需考虑探测信号功率不足的问题, 因此其生成的探测信号可以辐射到电气距离较远的电力元件。

除此以外,探测式保护在变压器励磁涌流识别、线路频变参数计算和 CT 二次电流拖尾判别等多方面,都可以进行探索性的研究。

#### 4.5 工程应用

主动探测式保护作为近年来新兴的一个研究方向,已经在故障测距、自适应重合闸等几个方向有所突破,但是尚未建立类似于传统保护中主保护与后备保护相互配合的保护架构,也没有形成一定体系的保护方案,目前在装置研制和工程应用方面也未见相关报道。对于如何验证主动探测式保护的性能,建立适用于探测式保护装置测试的实验环境,目前还没有可供参考的标准。

传统保护装置应用于电力系统,只需要获取测点的电压电流等信息,不需要其他装置的配合。而主动探测式保护在工程应用时,需要变流器控制系统的配合,因此在装置的研制、工程的设计施工等方面都要与变流器供应商加强沟通协调。

## 5 总结

回顾电力系统继电保护数十年的发展,保护性能的提升与观测手段的升级密切相关。最初的电流保护仅使用本地电流量,引入电压量后可以构造距离保护,引入对端电流信息后可以构造电流差动保护。保护性能越来越好的根本原因在于可用的信息越来越多。主动探测式保护也是继电保护观测手段升级的结果。传统方法只是被动地检测电力系统中产生的故障信息,而探测式保护主动向系统注入电气量并观测系统的响应。

主动探测式保护技术的研究还处于起步阶段,需要进一步研究多个变流器同时响应故障时的控制配合问题、变流器自身故障的应对以及探测信号传播路径优化等问题。

随着“双高”电力系统的发展,主动探测式保护能够以更低的成本,利用控制系统制造更加清晰明确的故障特征,为保护新原理的研究、保护新方案的设计提供新的思路,有望在未来电力系统中得到广泛应用。

### 参考文献

- [1] 文劲宇,周博,魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.  
WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.
- [2] 宋国兵,王婷,张保会,等. 利用电力电子装置的探测式故障识别技术分析与发展[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 173-183.
- [3] SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Baohui, et al. Analysis and prospect of detective fault identification technologies using power electronic device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 173-183.
- [3] 盛况,郭清,张军明,等. 碳化硅电力电子器件在电力系统的应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 1-7.
- [4] SHENG Kuang, GUO Qing, ZHANG Junming, et al. Development and prospect of sic power devices in power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(30): 1-7.
- [4] 侯俊杰,宋国兵,徐瑞东,等. 交直流混合电网故障耦合特性分析与继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 176-187.
- [4] HOU Junjie, SONG Guobing, XU Ruidong, et al. Fault coupling characteristic analysis and relay protection research on an AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 176-187.
- [5] 王慧,范正林,桑在中. “S注入法”与选线定位[J]. 电力自动化设备, 1999, 19(3): 18-20.
- [5] WANG Hui, FAN Zhenglin, SANG Zaizhong. The "S signal injection method" and its application in single phase-to-earth fault line identification and fault point location[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(3): 18-20.
- [6] 潘贞存,张慧芬,张帆,等. 信号注入式接地选线定位保护的分析和改进[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 71-75.
- [6] PAN Zhencun, ZHANG Huifen, ZHANG Fan, et al. Analysis and modification of signal injection based fault line selection protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 71-75.
- [7] 桑在中,张慧芬,潘贞存,等. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(2): 11-12.
- [7] SANG Zaizhong, ZHANG Huifen, PAN Zhencun, et al. Protection for single phase to earth fault line selection for ungrounded power system by injecting signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(2): 11-12.
- [8] 鹿洪刚,覃剑,陈祥训,等. 电力电缆故障测距综述[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 58-63.
- [8] LU Honggang, QIN Jian, CHEN Xiangxun, et al. Survey of power cable fault location[J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 58-63.
- [9] 梁栋,徐丙垠,谢伟,等. 基于小波脉冲相关的电缆故障时域反射测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 8050-8057, 8241.

- LIANG Dong, XU Bingyin, XIE Wei, et al. A time-domain-reflectometry cable fault location method using wavelet pulses and cross-correlation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 8050-8057, 8241.
- [10] 李峰, 徐丙垠. 电弧反射电缆故障测距装置脉冲发射时刻选择算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13): 88-91.
- LI Feng, XU Bingyin. Pulse emitting time selection algorithm for cable fault locator with arc reflection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 88-91.
- [11] 毕大强, 刘春秋, 葛宝明. 注入式发电机定子接地保护的自适应整定[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 64-68.
- BI Daqiang, LIU Chunqiu, GE Baoming. Self-adaptive setting for injecting source based stator ground fault protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 64-68.
- [12] BENGTTSSON T, GAJIC Z, JOHANSSON H, et al. Innovative injection-based 100% stator earth-fault protection[C] // 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012), April 23-26, 2012, Birmingham, UK.
- [13] SAFARI-SHAD N, FRANKLIN R, NEGAHDARI A, et al. Adaptive 100% injection-based generator stator ground fault protection with real-time fault location capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2364-2372.
- [14] OTERO M, BARRERA P M, BOSSIO G R, et al. Stator inter-turn faults diagnosis in induction motors using zero-sequence signal injection[J]. IET Electric Power Applications, 2021, 14(14).
- [15] 樊淑娴, 徐丙垠, 张清周. 注入方波信号的经消弧线圈接地系统故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 91-95.
- FAN Shuxian, XU Bingyin, ZHANG Qingzhou. A new method for fault line selection in distribution system with arc suppression coil grounding with square-wave signal injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 91-95.
- [16] 朱秀香. 基于直流注入原理的配电网单相故障选线定位研究[D]. 济南: 济南大学, 2010.
- ZHU Xiuxiang. Research on single-phase fault line selection and location in distribution network based on DC injection principle[D]. Jinan: Jinan University, 2010.
- [17] 高志鹏, 张慧芬, 孙旭娜. 注入半波直流的小电流接地故障选线定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 139-145.
- GAO Zhipeng, ZHANG Huifen, SUN Xuna. A method of fault line selection and fault point location with half-wave DC injection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 139-145.
- [18] 张慧芬, 潘贞存, 桑在中. 基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 64-66.
- ZHANG Huifen, PAN Zhencun, SANG Zaizhong. Injecting current based method for fault location in neutral isolated power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 64-66.
- [19] 张慧芬, 张帆, 潘贞存. 基于注入信号法的配电网单相接地故障自动定位算法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(6): 39-43.
- ZHANG Huifen, ZHANG Fan, PAN Zhencun. Automatic fault locating algorithm based on signal injection method for distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(6): 39-43.
- [20] 杜刚, 刘迅, 苏高峰. 基于 FTU 和“S”信号注入法的配电网接地故障定位技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 82-85.
- DU Gang, LIU Xun, SU Gaofeng. Research on technology of grounding fault location combining FTU and "S" signal injecting method in distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 82-85.
- [21] 岳舟. 一种新型高电压增益 DC-DC 变换器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 130-138.
- YUE Zhou. A novel high voltage gain DC-DC converter[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 130-138.
- [22] 孙元岗, 同向前, 李庚, 等. 一种双向谐振型高频直流变压器通用参数设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 29-35.
- SUN Yuangang, TONG Xiangqian, LI Geng, et al. A generalized parameter design approach for bidirectional resonant high frequency DC transformers[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 29-35.
- [23] HUANG A Q, BALIGA J. FREEDM system: role of power electronics and power semiconductors in developing an energy internet[C] // 2009 21st International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, June 14-18, 2009, Barcelona, Spain: 9-12.
- [24] 李宗鉴, 王俊, 江希, 等. Si IGBT/SiC MOSFET 混合器件及其应用研究[J]. 电源学报, 2020, 18(4): 58-70.
- LI Zongjian, WANG Jun, JIANG Xi, et al. Si IGBT/SiC MOSFET hybrid switch and its applications[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(4): 58-70.
- [25] 中国电力企业联合会. 光伏发电系统建模导则: GB/T 32826—2016[S].

- China Electricity Council. Guidelines for modeling of photovoltaic power generation systems: GB/T 32826—2016[S].
- [26] 张保会, 周良才. 变电站集中式后备保护[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 1-5.  
ZHANG Baohui, ZHOU Liangcai. Centralized substation backup protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 1-5.
- [27] 侯俊杰, 宋国兵, 常仲学, 等. 基于故障分量差动电流极性特征的直流线路故障全过程保护原理[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 11-19.  
HOU Junjie, SONG Guobing, CHANG Zhongxue, et al. DC line fault protection principle based on polarity characteristics of differential current of fault components for whole process of failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 11-19.
- [28] 刘健, 张志华, 芮俊, 等. 一二次配合的配电线路自适应重合闸[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 26-32.  
LIU Jian, ZHANG Zhihua, RUI Jun, et al. Adaptive reclosing of distribution lines based on primary and secondary device coordination[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 26-32.
- [29] 梁振锋, 索南加乐, 宋国兵, 等. 输电线路自适应重合闸研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 140-147.  
LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Research review of adaptive reclosure in transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 140-147.
- [30] 张文亮, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 先进电力电子技术在智能电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 1-7.  
ZHANG Wenliang, TANG Guangfu, ZHA Kunpeng, et al. Application of advanced power electronics in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 1-7.
- [31] 杭丽君, 闫东, 胡家兵, 等. 电力电子系统建模关键技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 2966-2980.  
HANG Lijun, YAN Dong, HU Jiabing, et al. Review and prospect of key modeling technologies for power electronics system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 2966-2980.
- [32] 曾志杰, 肖华锋, 高博, 等. 并网逆变器小信号建模简化方法与应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 7002-7012.  
ZENG Zhijie, XIAO Huafeng, GAO Bo, et al. Simplified small-signal modeling method of grid-connected inverters and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 7002-7012.
- [33] 申全宇, 杨忠礼, 宋国兵, 等. 一种含变流器电力元件的短路电流计算方法[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(4): 24-31.  
SHEN Quanyu, YANG Zhongli, SONG Guobing, et al. Short-circuit current computation method for electric elements with converter[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(4): 24-31.
- [34] 申全宇, 宋国兵, 王晨清, 等. 适用于继电保护的含变流器电力元件故障暂态快速仿真方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 90-94.  
SHEN Quanyu, SONG Guobing, WANG Chenqing, et al. Rapid fault transient simulation of electric elements with converter for relay protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 90-94.
- [35] 王晨清, 宋国兵, 汤海雁, 等. 选相及方向元件在风电接入系统中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 89-95.  
WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptability analysis of phase selectors and directional relays in power systems integrated with wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 89-95.
- [36] 张保会, 张金华, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电场送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 1-6.  
ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection(6): analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 1-6.
- [37] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5457-5467.  
HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457-5467.
- [38] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154.  
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154.
- [39] 张芳, 杜雪靓, 陈堃. MMC-HVDC 系统换流器桥臂短路故障暂态特性分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 180-187.  
ZHANG Fang, DU Xueliang, CHEN Kun. Transient

- characteristic analysis of converter bridge arm short circuit fault in MMC-HVDC system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(5): 180-187.
- [40] 熊小伏, 齐晓光, 欧阳金鑫. 双馈风电机组短路电流对变压器保护二次谐波制动的的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(13): 2201-2209.  
XIONG Xiaofu, QI Xiaoguang, OUYANG Jinxin. Effect of doubly-fed wind turbines short-circuit current on second harmonic escapement of transformer protection[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(13): 2201-2209.
- [41] 尹项根, 陈德树, 张哲, 等. 故障分量差动保护[J]. *电力系统自动化*, 1999(11): 13-17.  
YIN Xianggen, CHEN Deshu, ZHANG Zhe, et al. Fault component based digital differential protection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1999(11): 13-17.
- [42] 索南加乐, 康小宁, 宋国兵, 等. 基于参数识别的继电保护原理初探[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2007, 19(1): 14-20, 27.  
SUONAN Jiale, KANG Xiaoning, SONG Guobing, et al. Survey on relay protection using parameter identification[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2007, 19(1): 14-20, 27.
- [43] MA Jing, LIU Chen, CHENG Peng, et al. A novel AC line distance protection scheme for AC/DC hybrid system based on fault component energy equation[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2022, 134(1): 1-18.
- [44] 徐瑞东, 常仲学, 宋国兵, 等. 注入探测信号的直流配电网接地故障识别方法[J]. *电网技术*, 2021, 45(11): 4269-4277.  
XU Ruidong, CHANG Zhongxue, SONG Guobing, et al. Grounding fault identification method for DC distribution network based on detection signal injection[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(11): 4269-4277.
- [45] 董鹏. 用于多端柔性直流电网的 MMC 换流器关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.  
DONG Peng. Research on key technologies of MMC converter for multi terminal flexible DC power grid[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2019.
- [46] 喻锋, 王西田. 基于冒泡原理的模块化多电平换流器快速电压均衡控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(9): 81-86.  
YU Feng, WANG Xitian. Fast voltage balancing control based on bubbling principle for modular multilevel converter[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(9): 81-86.
- [47] 宋国兵, 侯俊杰, 郭冰. 基于主动探测式的柔性直流电网纵联保护[J]. *电网技术*, 2020, 44(10): 4001-4010.  
SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing. Pilot protection of flexible dc grid based on active detection[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(10): 4001-4010.
- [48] WANG Ting, SONG Guobing, HUSSAIN K S T. Three-phase adaptive auto-reclosing for single outgoing line of wind farm based on active detection from STATCOM[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(4): 1918-1927.
- [49] 索南加乐, 张健康, 刘辉, 等. 故障分量提取及故障选相的新方法[J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(16): 58-61, 66.  
SUONAN Jiale, ZHANG Jiankang, LIU Hui, et al. A new method for fault components extraction and fault phases selection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(16): 58-61, 66.
- [50] ZHANG Chenhao, SONG Guobing, YANG Liming, et al. Non-unit travelling wave protection method for DC transmission line using waveform correlation calculation[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(12): 2263-2270.
- [51] ZHANG Chenhao, SONG Guobing, YANG Liming, et al. Time-domain single-ended fault location method that does not need remote-end system information[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(2): 284-293.
- [52] 薛士敏, 刘存甲, 李蒸, 等. 基于控保协同的环形直流微网单端测距保护技术[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(5): 122-129.  
XUE Shimin, LIU Cunja, LI Zheng, et al. Single-end ranging protection technology for ring DC microgrid based on coordinated control and protection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(5): 122-129.
- [53] 王聪博, 贾科, 毕天姝, 等. 基于控保协同的多端柔性直流配电系统线路保护[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(8): 2559-2568.  
WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Line protection for multi-terminal flexible DC distribution system based on control and protection coordination[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(8): 2559-2568.
- [54] 贾科, 宣振文, 朱正轩, 等. 光伏直流升压接入系统故障穿越协同控保方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(10): 3249-3258.  
JIA Ke, XUAN Zhenwen, ZHU Zhengxuan, et al. A Coordinated control and active protection for PV DC boosting integration system during FRT[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(10): 3249-3258.
- [55] 朱瑞, 贾科, 赵其娟, 等. 光伏直流并网系统控保协同故障区段辨识方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(8): 2825-2835.  
ZHU Rui, JIA Ke, ZHAO Qijuan, et al. Fault section identification of flexible DC collection system based on

collaborated control-protection method[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2825-2835.

[56] 贾科, 宣振文, 陈金锋, 等. 基于控保协同的光伏直流升压汇集系统直流故障判别方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 134-141, 164.  
JIA Ke, XUAN Zhenwen, CHEN Jinfeng, et al. Control and protection coordination based identification strategy of DC fault for photovoltaic DC boosting integration system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 134-141, 164.

[57] 李斌, 孙强, 何佳伟, 等. 基于谐波注入的柔性直流系统接地极线路故障测距方法[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4773-4782.  
LI Bin, SUN Qiang, HE Jiawei, et al. Fault location for grounding electrode line of MMC DC system based on harmonic injection[J]. Power System Technology, 2020, 44 (12): 4773-4782.

[58] 张怿宁, 郝洪民, 李京, 等. 脉冲注入法和单端故障行波法相结合的直流输电系统接地极线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 117-122.  
ZHANG Yining, HAO Hongmin, LI Jing, et al. Fault location of HVDC grounding electrode lines based on combination of pulse injection method and single-ended fault travelling wave method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 117-122.

[59] 蔡普成, 向往, 周猛, 等. 含混合型 MMC 的四端柔性直流电网改进自适应重合闸策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 87-93.  
CAI Pucheng, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. An Improved adaptive reclosing strategy of four-terminal flexible DC grid with hybrid modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 87-93.

[60] 宋国兵, 王婷, 张晨浩, 等. 利用全桥 MMC 注入特征信号的直流自适应重合闸方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 149-156.  
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Chenhao, et al. Adaptive auto-reclosing of DC line based on characteristic signal injection with FB-MMC[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 149-156.

[61] WANG Ting, SONG Guobing, HUSSAIN K S T. Adaptive single-pole auto-reclosing scheme for hybrid MMC-HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6): 2194-2203.

[62] JIA K, SHI Z, WU W, et al. Incipient fault identification-based protection for a photovoltaic DC integration system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3): 1660-1670.

[63] SOLEIMANISARDOO A, HOSSEIN K K, ZEINELDIN H H. Differential frequency protection scheme based on off-nominal frequency injections for inverter-based islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2107-2114.

[64] JIA K, CHEN J, ZHAO G, et al. Second harmonic injection-based recovery control of PV DC boosting integration system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1022-1032.

[65] 刘革明, 杨琰, 吴殿峰, 等. 变压器式可控高抗对线路差动保护的影响及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 133-138.  
LIU Geming, YANG Yan, WU Dianfeng, et al. A study of effect of controllable shunt reactor of transformer type on line differential protection and countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 133-138.

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2023-01-13

作者简介:

陈福锋(1979—), 男, 博士研究生, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: fufeng-chen@sac-china.com

杨黎明(1988—), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: liming-yang@sac-china.com

宋国兵(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: song.gb@mail.xjtu.edu.cn

(编辑 许威)