

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.009

配电网单相接地故障有源消弧技术综述

卫晓辉¹, 邵文权², 程远^{2,3}, 徐嘉鹏²

(1. 国网陕西省电力公司西安供电公司, 陕西 西安 710032; 2. 西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048; 3. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要:多种形式的新能源、大量电力电子用户等越来越多地接入配电网是必然的发展趋势,这可能会导致接地故障电流中的无功分量、有功分量及谐波含量越来越高。采用消弧线圈的无源消弧技术存在单相接地故障残流的无功分量、有功分量和谐波分量较大等问题,采用外加注入主动干预方式的有源消弧技术已成为解决此类问题的有效手段。文中对配电网单相接地故障有源消弧技术的研究现状进行总结综述,主要阐述了有源消弧装置结构和控制算法两部分内容。首先,从成本、优缺点、连接方式等方面对消弧装置硬件结构进行分析;其次,将电压消弧算法、电流消弧算法、综合消弧算法的优缺点进行对比研究;最后从有源消弧技术的硬件结构和控制算法2个方面进行了展望,并给出了后续研究可能存在的问题以及研究方向。

关键词:单相接地故障;有源消弧;配电网;换流器;无源消弧

中图分类号: TM774

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)06-0058-08

0 引言

目前配电网中大量使用电力电子设备等非线性负荷,且电缆线路的占比越来越高,因此接地故障电流中的无功分量、有功分量及谐波含量越来越高,接地故障中有功电流和谐波电流分量占比可超过全部电流的10%^[1]。由部分地区电网实测数据可知^[2],谐波分量过高是导致单相接地故障扩大不可忽略的因素,接地故障电流中有功分量的幅值就可高达13 A。通常认为,单相接地故障电流小于5 A时,电弧能自行熄灭,故障电流越接近于0,熄弧效果越好。这种情况下故障残流较大,残留有功或谐波分量都足以导致电弧不能自行熄灭,甚至会引引起过电压及故障进一步发展,进而影响电网稳定运行及人身安全。

采取有效的消弧措施,对接地电弧的熄灭、瞬时接地故障的恢复非常重要。无源消弧技术和有源消弧技术的主要区别在于消弧装置中是否有电力电子换流器,有源消弧技术中换流器可以作为主动式注入电源来进行消弧。目前在配电网中广泛采用的无源消弧方法主要有2种^[3-4]:一种是配电网中性点接消弧线圈的方式,但消弧线圈体积庞大,只能补偿接地故障电流的无功分量,对有功及谐波分量无能为力。另外其调整困难,操作繁琐,易产生谐振过电压,并且该方式在目前的电网运行中存在安全瓶颈、选线瓶颈与容量瓶颈问题^[5-6]。另一种是采用接地故障转移的“消弧柜”技术进行

消弧。此方法将接地故障相线路直接在母线处通过高压开关进行接地,通过钳制故障相电压的方法阻止故障电弧重燃。但是开关短路前数十毫秒的故障电弧不能得到有效抑制,消弧效果受开关动作速度的限制,且接地旁路冲击电流大,容易引发谐振过电压^[1]。也有采用电抗器或电阻短路接地故障相的方法来限制短路电流,但消弧效果没有显著提高^[1,7]。这类方法依赖于准确的故障选相,一旦选相失败误合闸于非故障相,相当于发生两相接地故障^[8]。

综上所述,无源消弧技术存在难以将接地故障电流全部补偿、易产生谐振过电压等缺点,消弧效果非常有限。近年来,采用外加注入主动干预方式的有源消弧技术成为配电网单相故障处理中一个重要的研究方向。相对于无源消弧技术,有源消弧技术理论上能精确、快速地补偿接地故障电流全部的无功、有功及谐波分量,也不存在谐振问题。但是目前国内鲜有文献对相关技术进行综述报道。文中介绍了配电网单相接地故障有源消弧技术的发展情况,并结合研究现状和目前存在的问题给出后续研究需要关注的问题、研究难点以及可能的研究方向。

1 有源消弧结构

有源消弧结构分为混合式有源消弧结构和全电力电子式有源消弧结构2种,两者的主要区别在于消弧装置中是否配置消弧线圈。最初的有源消弧技术研究是基于混合式有源消弧结构进行的,随

着电力电子技术的发展,近些年的研究主要集中于电力电子式有源消弧结构。

1.1 混合式有源消弧结构

混合式有源消弧装置主要由消弧线圈和换流器两部分构成,消弧线圈进行主要消弧,换流器进行辅助消弧。消弧线圈和换流器的电路连接方式主要有并联型和串联型2种,目前绝大多数研究都是基于并联型连接的消弧装置进行。

1.1.1 并联型混合有源消弧结构

最初提出的有源消弧技术本质为主从式消弧结构^[9-11],消弧装置接于配电网中性点,其结构如图1所示。其中, $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ 分别为配电网A,B,C三相电源电压; $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ 分别为三相相电压; \dot{U}_0 为中性点电压; r_a, r_b, r_c 分别为三相对地泄漏电阻; C_a, C_b, C_c 分别为三相对地等效电容; R_d 为接地故障过渡电阻。

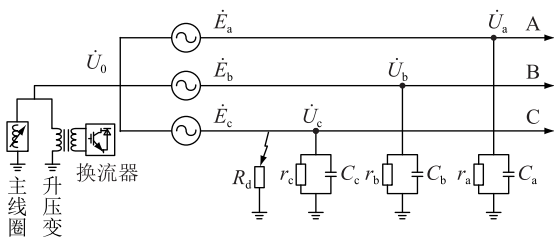


图1 消弧线圈加换流器并联消弧结构

Fig.1 Parallel structure of arc suppression coil and converter

一般采用消弧线圈作为主体消弧线圈,换流器作为附加补偿部分。故障时主、从消弧结构需要相互配合发挥作用,主消弧线圈用于补偿大部分的接地故障电流,熄灭电网中60%~80%电弧,可以降低从消弧线圈容量,也有利于换流器补偿快速响应。换流器用于剩余接地残流的精确补偿,主要是有功及谐波分量。换流器通常采用单相电压源逆变器,由于逆变器采用低电平输出,输出电压不高,因此需要通过升压变压器才能接入电网。由于控制目标是接地故障电流最小化,因此属于电流消弧法。

对于电容电流大的配电网,基于电流消弧方法的主从式消弧装置存在容量增大、造价变高的缺点。针对此问题,有学者提出电压消弧方法^[1],其实质是对故障相恢复电压控制,电压消弧方法就是对零序电压的控制。

主体消弧线圈采用调匝式消弧线圈时,无功电流不能连续调节,因此换流器还需补偿剩余的无功分量^[1,9]。文献[12]提出了磁控电抗器取代调匝式消弧线圈作为主体消弧线圈的主从式消弧装置,等效电抗可实现连续平滑调节,故障时主消弧线圈补

偿全部无功分量,换流器只需要补偿有功和谐波分量,所需容量配置可以进一步减小。

单相电压源逆变器作为主从式消弧装置的换流器应用时,因器件耐压水平受限,输出电平数较少,其输出必须经升压变压器后才能接入配电网,且其自身存在开关器件工作频率较高、损耗大、谐波含量较高、输出容量受限等问题。升压变压器由于内部存在短路阻抗,也会对控制消弧的效果产生不利影响。文献[13-14]采用单相级联H桥多电平逆变器取代单相电压源逆变器和升压变压器作为从属消弧线圈的结构。级联H桥多电平逆变器由N个全桥单元串联构成,具有输出电压高和谐波含量低的特性,但会引起造价升高。

1.1.2 串联型混合有源消弧结构

文献[15]提出一种基于消弧线圈和三相级联H桥多电平换流器串联的故障消弧结构,如图2所示。换流器不是接于配电网中性点,而是通过电感接入配电网母线。这种结构必然会造成成本增大,但是不仅可以实现消弧功能,而且可以实现无功补偿作用,并且单相接地故障时2个功能可以同时运行,互不影响。单相接地故障发生后,消弧线圈补偿接地故障电流中的大部分基波分量,另外通过增加共模控制回路的方法来补偿接地故障电流中剩余的基波、谐波和有功分量。

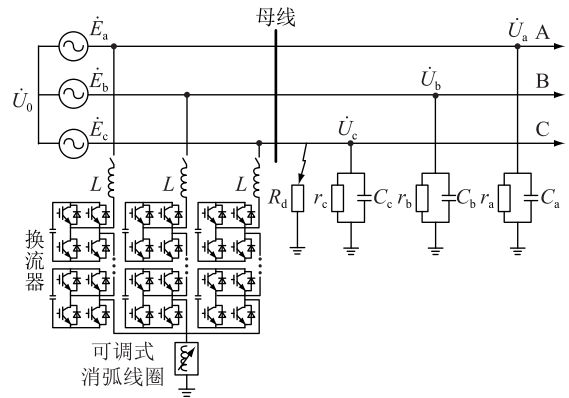


图2 消弧线圈加换流器串联消弧结构

Fig.2 Series structure of arc suppression coil and converter

1.2 全电力电子式有源消弧结构

升压变压器和传统消弧线圈的等效电感会对消弧控制效果产生影响,带有消弧线圈的主从式消弧结构存在协调控制配合问题^[16-18]。因此出现了没有消弧线圈的全电力电子式有源消弧装置,单纯依靠换流器进行消弧。全电力电子式有源消弧装置根据补偿相不同主要分为单相有源消弧结构和三相有源消弧结构。

1.2.1 单相有源消弧结构

文献[19]提出一种无消弧线圈的纯电力电子主从式有源消弧结构,采用单相电压源逆变器取代主消弧线圈。主逆变器用于补偿故障电流基波与有功分量,从逆变器用于补偿谐波分量。这样主、从逆变器的容量可以根据电网实际情况来设置,但由于逆变器输出电压低,因此升压变压器无法省略,并且这种结构的从逆变器还需要补偿的主逆变器自身所产生的谐波。

有学者提出采用单相级联 H 桥多电平变流器作为消弧装置的结构^[20—21],通过电感接入配电网中性点实现接地电流的有源补偿,其结构如图 3 所示。这种结构势必造价昂贵,控制更为复杂,不过具有无需与消弧线圈、升压变压器配合使用,功率容量大,器件开关频率低、损耗小、谐波少,且易于模块化等优点。

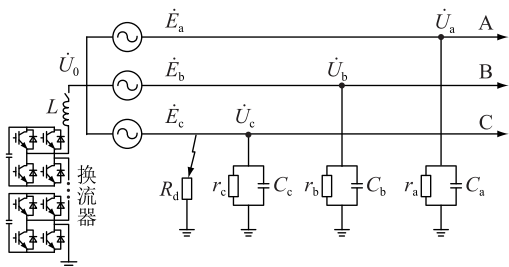


图 3 单相换流器有源消弧结构
Fig.3 Active arc suppression structure of single phase converter

1.2.2 三相有源消弧结构

文献[22—23]提出基于三相级联 H 桥换流器的接地故障消弧结构,三相换流器通过电感直接接入配网母线,其结构见图 4。三相级联 H 桥换流器本质是由 3 个单相 H 桥换流器组成,因此可以通过控制三相级联 H 桥换流器单相、两相或三相模式进行补偿。相对于传统消弧方法,其成本势必增加,但可以通过软件功能的多样化来弥补硬件成本高的缺点,提高该结构经济性,降低综合成本。由于采用三相结构,其可靠性和冗余性大大增强,某个基本单元或者某相结构故障时,可退出工作,并不影响其他单元正常工作。当投入单相或三相级联 H 桥换流器时,这种结构将不受故障选相错误的影响。

文献[24]基于三相级联 H 桥换流器,提出了基于级联 H 桥静止无功发生器的有源消弧结构,具体结构如图 5 所示。通过 4 个高压开关的开断状态组合实现消弧功能与无功补偿功能的切换。一般的静止无功补偿器中性点并不接地,当配电网正常运行时,静止无功发生器工作于无功补偿模式,此时 K_4 开关断开,其余 3 个开关闭合。当配电网发生单

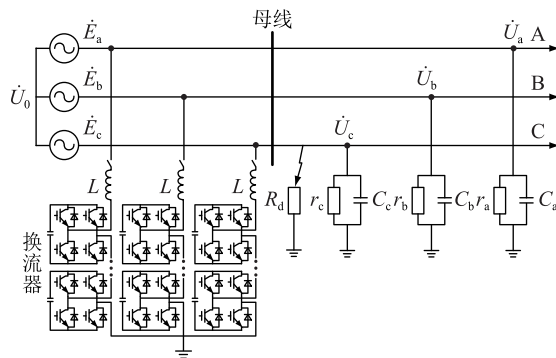


图 4 三相换流器有源消弧结构
Fig.4 Active arc suppression structure of three phase converter

相接地故障时,消弧装置需要接地,此时 K_4 开关闭合,故障相所接高压开关断开,2 个非接地相桥臂向配电网中注入消弧补偿电流,进行消弧。

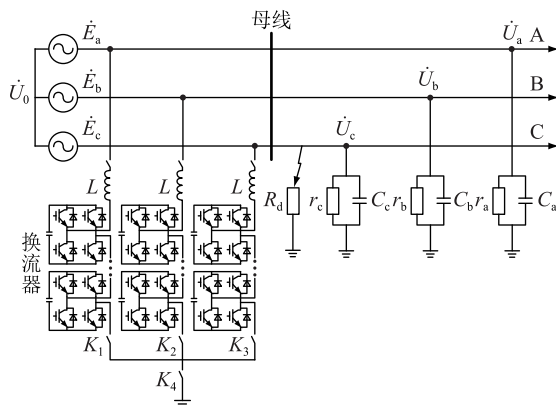


图 5 带无功补偿功能的有源消弧结构
Fig.5 Active arc suppression structure with reactive power compensation function

文献[15]和文献[24]中 2 种不同技术的对比如表 1 所示。

表 1 2 种技术的比较
Table 1 Comparison of two technologies

结构	优点	缺点
三相级联 H 桥加消弧线圈 (文献[15])	无功补偿和消弧功能可以同时运行,单相只需承受相电压,设备成本较低	控制复杂,当单相金属性接地时,故障消弧性能较差
三相级联 H 桥加高压开关 (文献[24])	结构简单,控制简单,故障消弧性能较好	无功补偿和消弧功能不能同时运行,单相耐受电压为线电压

2 控制算法分析

有源消弧技术需要考虑故障选相问题,尤其是故障选相错误对消弧作用的影响。有源消弧装置的控制算法根据控制目标的不同分为电压消弧、电流消弧和综合消弧 3 类。

2.1 故障选相问题

单相接地故障消弧的前提是必须正确选择接

地故障相,这对于单相换流器有源消弧技术尤为重要。故障选相错误将造成接地故障电流增大,不仅无法实现故障消弧,还增加了电弧重燃的机率^[22]。故障选相问题的研究可基于2个方向开展:一是优化故障选相技术,提高故障选相准确性。比如文献[25—28]通过故障前、后的对地参数的计算进行选相,或者通过故障相的前一相电压最高的特点进行选相,或者通过故障电流的相位与故障相电压的相位相同的特征进行选相,以解决高阻接地时故障相不一定最低的问题。二是研究故障选相错误对有源消弧技术消弧性能的影响。文献[22]提出基于三相级联H桥换流器的接地故障消弧结构,由于其算法利用实测零序电压计算注入补偿电流值,并没有用到各相序信息,因此单相或三相级联H桥换流器工作不会受故障选相错误的影响,即单相或三相级联H桥换流器工作时不需要进行故障选相。两相级联H桥换流器工作时,即使故障选相错误,也会使故障电流减小。可以看出,有源消弧技术是可以通过硬件结构或软件算法的优化来避免或者减小选相错误的影响,是值得进一步研究的问题。

2.2 电压消弧算法

电压消弧算法的注入零序电流大小与故障电阻无关,只与配电网中性点接地阻抗、故障相电源电动势、配电网单相对地泄漏电阻和配电网单相对地电容有关^[1]。可以利用基于工频信号注入的检测方法求得配电网对地参数^[29—30]。通过上述参数计算出来的电流作为指令电流,属于开环控制,实现简单,计算量小,但精度显然会受配电网参数影响。为了解决这个问题,有文献提出采用闭环控制^[31—33],选取故障相电源电动势相反数作为零序参考电压,以实现接地故障电压抑制到零的目标,从而省去了故障前配电网单相对地泄露电阻及单相对地电容的测量,还有故障后配电网中性点阻抗的测量。也有文献利用类似于爬山算法的思想^[34],公式计算得到的电流幅值和相位2个量作为参考电流初始值,然后通过分别调整步长、比较故障相对地电压的变化结果来选取局部最优解,通过微调达到优化控制效果的目的。

有源电压消弧法易于观测,但是研究发现,当过渡电阻较小、负荷电流较大、故障距离较远时,其可能会增大故障点电流,影响熄弧效果^[7,30,35]。

2.3 电流消弧算法

电流消弧算法注入的基波补偿电流值与故障电阻无关,仅与接地故障相电源电动势、配电网的等效对地电容和泄漏电阻有关^[18]。对地电容和泄

漏电阻可在配电网正常运行时,利用基于工频信号注入的配电网对地参数检测方法求得。对地参数测量不精确的情况下,接地故障残流较大。补偿电流谐波分量通过故障后中性点电压谐波分量求得,中性点电压谐波分量可用快速傅立叶算法求取,精确提取谐波电流有一定困难。

有源电流消弧法在理论上能将接地电流补偿到0,但由于故障点电流不能直接测量,只能依赖系统固有参数推算,补偿效果不易直接观测,且有源电流消弧法难以实时反映故障后配电网结构的改变^[30]。

2.4 综合消弧算法

鉴于电压消弧算法和电流算法各自的优缺点,文献[30]提出有源电流消弧法和电压消弧法综合算法,用接地电阻大小作为算法切换条件,在接地电阻较大时采用电压消弧法,接地电阻较小时采用电流消弧法,能实时反映大部分配电网结构的改变。不过该电流消弧法对配电网自动化设备依赖性较高,实用性有限。文献[36]提出以零序电压作为电压消弧方法和电流消弧方法切换条件的综合算法,以正常运行时线路电压降不超过5%为依据,计算出零序电压的边界值,作为电压消弧方法和电流消弧方法的切换条件,其适用性有待进一步研究。文献[37]详细研究了有源电压消弧法能起到灭弧作用的过渡电阻和负荷电流应满足的条件,通过相应的条件限制确保故障点电流不增大,促进故障点熄弧。可以知道过渡电阻、故障点到母线的线路距离、故障馈线故障相负荷电流、线路正序阻抗、零序阻抗等都会影响有源电压消弧的消弧性能。理想情况下,电流消弧方法和电压消弧方法的消弧效果应该相同,但是由于故障情况的复杂性,各自适用范围均有局限性,实用化的综合算法仍待进一步研究优化。

3 研究展望

3.1 结构研究展望

有源消弧技术由于采用了换流器结构,因此硬件装置成本较高,可以从2方面考虑成本的降低:一个是直接降低硬件成本,比如采用不对称级联多电平结构的换流器等;另一个是软件功能多样化,包括保护与控制一体化,如故障消弧、故障选线、谐波抑制、无功补偿、过电压抑制^[38—39]等复合功能。

较长时间内无源消弧技术仍旧会大量应用于配电网,所以需要关注混合式有源消弧技术,同时需要重点研究有源消弧和无源消弧的配合协调问

题,研究成果可以为实际电网的改造增容提供重要借鉴。

3.2 控制算法研究展望

有源消弧技术适用于电缆占比较高、电缆同沟情况严重、非线性负载较多的城市配电网。由于采用了换流器装置,对电网也会产生一定谐波,因此其控制算法的精确性以及系统的可靠性尤为关键。相关技术研究应该同步考虑系统容错、冗余能力,也需要注意分布式电源接入配电网所带来的故障特性变化等问题^[40-41]。

电压和电流消弧算法是有源消弧控制的核心,电压消弧算法和电流消弧算法各自的有效适用范围仍值得进一步研究。2种算法如何有效优化融合且实用化是综合算法的难点。由于有源消弧技术中间侧需要直流电源,因此也需要关注直流电压的平衡控制问题。

4 结论

有源消弧技术可以实现接地故障电流的全补偿,从而保证故障残流在较低的安全水平,因此成为配电网单相接地故障处理中一个重要的研究方向。文中介绍了配电网单相接地故障有源消弧技术的发展情况,并结合配电网的情况给出以下结论:

(1) 电网对安全性、可靠性、自动化以及智能化等方面的要求越来越高,有源消弧技术在配电网中广泛应用的远景值得期待。

(2) 有源消弧技术中换流器结构选择应考虑控制效果和综合成本。混合式有源消弧技术在近期电网改造和发展中值得关注。

(3) 电压和电流消弧算法是有源消弧控制的核心,算法的优化以及实用化仍值得进一步研究,比如配电网参数对消弧性能的影响、谐波分量的精确快速提取、算法的有效范围、目前的配电网自动化水平不高等问题。

本文得到西安市科技计划项目(2019217114G-XRC007CG008-GXYD7.4)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 曾祥君,王媛媛,李健,等. 基于配电网柔性接地控制的故障消弧与馈线保护新原理[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):137-143.
ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing & feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 137-143.

[2] 李晓波,王崇林. 零残流消弧线圈综述[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):116-121.

LI Xiaobo, WANG Chonglin. Survey of zero residual current arc suppression coil [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 116-121.

[3] 张辉. 关于配电网中性点经消弧线圈接地方式的探讨[J]. 电瓷避雷器,2019(3):87-91.
ZHANG Hui. Discussion on earthing mode of neutral point through arc suppression coil in distribution network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3): 87-91.

[4] 余斌,尹项根,朱维钧,等. 复合接地消弧方式接地故障分析及保护对策[J]. 中国电力,2018,51(12):72-79.
YU Bin, YIN Xianggen, ZHU Weijun, et al. Grounding fault analysis and protection scheme study for composite grounding arc-suppression mode [J]. Electric Power, 2018, 51(12): 72-79.

[5] 范松海,陈坤燚,肖先勇,等. 配电网单相接地故障残余电流转移消弧方法[J]. 电测与仪表,2019,56(11):20-25.
FAN Songhai, CHEN Kunyi, XIAO Xianyong, et al. Arc-suppression method based on transferring the residual current of single phase grounding fault in distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(11): 20-25.

[6] 李政洋,李景禄,张春辉,等. 基于故障相智能接地方式的配电网多功能安全接地处理装置[J]. 电瓷避雷器,2019(1):116-119.
LI Zhengyang, LI Jinglu, ZHANG Chunhui, et al. Multifunctional safety earthing treatment device for distribution network based on intelligent earthing method of fault phase[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(1): 116-119.

[7] 赵军,阮琦,李景禄. 考虑线路压降的快速接地开关消弧性能及应用[J]. 电力系统自动化,2018,42(20):158-164.
ZHAO Jun, RUAN Qi, LI Jinglu. Arc eliminating performance and application of fast grounding switch considering line voltage drop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 158-164.

[8] 杨文勇,戴宇,刘丽,等. 配电网开关型消弧装置选相失败的特性及对策研究[J]. 供用电,2019,36(2):78-83.
YANG Wenyong, DAI Yu, LIU Li, et al. Research on characteristics and countermeasures of phase selection failure of switch-type arc suppression device [J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(2): 78-83.

[9] 曲轶龙,董一脉,谭伟璞,等. 基于单相有源滤波技术的新型消弧线圈的研究[J]. 继电器,2007,35(3):29-33.
QU Yilong, DONG Yimai, TAN Weipu, et al. Single-phase active power filter technology based on the study of the new type of arc suppression coil [J]. Relay, 2007, 35(3): 29-33.

[10] 邢雅萍. 有源全补偿消弧线圈的研究[D]. 淄博:山东理工大学,2018.
XING Yaping. Research on active fully compensated arc suppression coil [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2018.

[11] 李一博. 基于柔性全补偿消弧装置的配电网对地电容电流测量技术研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2019.
LI Yibo. Research on capacitance-to-ground current measure-

- ment technology of distribution network based on flexible full-compensation arc-suppression device [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019.
- [12] 陈柏超,王朋,沈伟伟,等. 电磁混合式消弧线圈的全补偿故障消弧原理及其柔性控制策略[J]. 电工技术学报, 2015,30(10):311-318.
CHEN Baichao, WANG Peng, SHEN Weiwei, et al. The principle of full compensation arc suppression and flexible control of electromagnetic hybrid Petersen coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10):311-318.
- [13] 吕涛,邵文权,程远,等. 配电网有源消弧深度补偿的分析与仿真研究[J]. 智慧电力, 2018,46(4):33-38.
LYU Tao, SHAO Wenquan, CHENG Yuan, et al. Analysis and simulation research on full compensation of distribution network active arc-suppression [J]. Smart Power, 2018, 46(4):33-38.
- [14] 吕涛. 配电网单相接地故障电流有源全补偿技术的研究[D]. 西安:西安工程大学, 2018.
LYU Tao. Research on active full-compensation single-phase grounding fault current in distribution network [D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2018.
- [15] 周兴达,陆帅. 一种基于消弧线圈和静止同步补偿器协同作用的配电网消弧结构与方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6):1251-1262.
ZHOU Xingda, LU Shuai. An arc-suppression method based on the coordinated operation of the petersen coil and the static synchronous compensator in distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6):1251-1262.
- [16] 贾晨曦,杨龙月,杜贵府. 全电流补偿消弧线圈关键技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015,43(9):145-154.
JIA Chenxi, YANG Longyue, DU Guifu. Review of key technologies on full current compensation arc suppression coil [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9):145-154.
- [17] 吴斌,陈纲,金云奎,等. 一种新型的消弧线圈自动跟踪补偿装置[J]. 电力系统保护与控制, 2018,46(19):151-157.
WU Bin, CHEN Gang, JIN Yunkui, et al. A new type of arc-suppression coil automatic tracking compensation device [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19):151-157.
- [18] 徐铭铭,高淑萍,常仲学,等. 基于模型识别的消弧线圈接地系统单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018,46(2):73-78.
XU Mingming, GAO Shuping, CHANG Zhongxue, et al. Model recognition based single-phase earthed faulty line selection method of Petersen coil grounded system [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2):73-78.
- [19] 陈忠仁,张波. 基于主从逆变器的无感消弧有源接地补偿系统[J]. 电力自动化设备, 2014,34(6):62-67.
CHEN Zhongren, ZHANG Bo. Non-inductive arc suppression and active grounding compensation system based on master-slave inverters [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6):62-67.
- [20] 郭谋发,陈静洁,张伟骏,等. 基于单相级联 H 桥变流器的配电网故障消弧与选线新方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9):2677-2684.
GUO Moufa, CHEN Jingjie, ZHANG Weijun, et al. Distribution network fault arc-suppression and new method of line selection based on single phase cascade H-bridge converter [J]. Power System Technology, 2015, 39(9):2677-2684.
- [21] 林先辉,郭谋发,张伟骏,等. 用于配电网故障消弧的级联 H 桥多电平变换器设计及仿真[J]. 电气技术, 2015(12):10-14, 21.
LIN Xianhui, GUO Moufa, ZHANG Weijun, et al. Design and simulation of cascaded H-bridge multilevel converters used for faults arc extinguishing of distribution networks [J]. Electrical Engineering, 2015(12):10-14, 21.
- [22] 郭谋发,游建章,张伟骏,等. 基于三相级联 H 桥变流器的配电网接地故障分相柔性消弧方法[J]. 电工技术学报, 2016,31(17):11-22.
GUO Moufa, YOU Jianzhang, ZHANG Weijun, et al. Separate-phase flexible arc-suppression method of earth-fault in distribution systems based on three phase cascaded H-bridge converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17):11-22.
- [23] 邱伟强,郭谋发,郑泽胤. 基于单一直流源级联 H 桥变流器的配电网接地故障柔性消弧方法[J]. 电网技术, 2019, 43(10):3848-3858.
QIU Weiqiang, GUO Moufa, ZHENG Zeyin. Flexible arc-suppression method based on single-DC-source cascaded H-bridge converter for earth fault in distribution networks [J]. Power System Technology, 2019, 43(10):3848-3858.
- [24] 周兴达,陆帅,陈杨明,等. 基于 SVG 两相电流注入的配电网单相接地故障消弧方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10):142-149.
ZHOU Xingda, LU Shuai, CHEN Yangming, et al. Single-phase-to-ground fault arc-extinguishing method for distribution network based on SVG two-phase current injection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10):142-149.
- [25] 杨帆. 基于有源工频电流注入的配电网对地参数精确测量[J]. 电力科学与技术学报, 2018,33(1):81-87.
YANG Fan. Ground parameters accuracy measurement in distribution network based on active current injection with power frequency [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1):81-87.
- [26] 艾绍贵,李秀广,黎炜,等. 配电网快速开关型消除弧光接地故障技术研究[J]. 高压电器, 2017,53(3):178-184.
AI Shaogui, LI Xiuguang, LI Wei, et al. Arc suppression technology based on fast switch for distribution network [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3):178-184.
- [27] 杨磊,曾祥君,喻锟,等. 新型谐振接地系统接地故障全补偿方法[J]. 电力自动化设备, 2018,38(11):57-62.
YANG Lei, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Novel method of full compensation for grounding fault of resonant grounding system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11):57-62.

- (11):57-62.
- [28] 刘宝稳,马宏忠,沈培锋,等. 新型接地故障基波电流全补偿柔性控制系统[J]. 中国电机工程学报,2016,36(9):2322-2330.
LIU Baowen,MA Hongzhong,SHEN Peifeng,et al. New flexible control system of full compensation single-phase ground fault fundamental current[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(9):2322-2330.
- [29] 彭沙沙,曾祥君,喻琨,等. 基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(20):142-149.
PENG Shasha,ZENG Xiangjun,YU Kun,et al. Active arc-suppression method of grounding fault for distribution network based on secondary injection[J]. Power System Protection and Control,2018,46(20):142-149.
- [30] 刘维功,薛永端,徐丙垠,等. 可适应线路结构动态变化的有源消弧算法[J]. 电网技术,2014,38(7):2008-2013.
LIU Weigong,XUE Yongduan,XU Bingyin,et al. An active arc-suppression algorithm adaptable to dynamic structure variation of transmission line[J]. Power System Technology,2014,38(7):2008-2013.
- [31] 陈锐,周丰,翁洪杰,等. 基于双闭环控制的柔性接地装置消弧方法[J]. 电力科学与技术学报,2015,30(4):63-70.
CHEN Rui,ZHOU Feng,WENG Hongjie,et al. Flexible grounding device with the dual-loop control method for arc suppression[J]. Journal of Electric Power Science And Technology,2015,30(4):63-70.
- [32] 陈锐,周丰,翁洪杰,等. 基于双闭环控制的配电网单相接地故障有源消弧方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(5):128-133.
CHEN Rui,ZHOU Feng,WENG Hongjie,et al. Active arc-suppression method based on double closed-loop control under single-phase grounding faults in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(5):128-133.
- [33] 刘永康. 基于双闭环控制的有源电压消弧方法的优化研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.
LIU Yongkang. Optimization research of active voltage arc extinguishing method based on double closed loop control [D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2019.
- [34] 张健,贺蕾思思,陈锐,等. 基于寻优控制的配电网单相接地故障有源消弧方法[J]. 广东电力,2017,30(2):129-136.
ZHANG Jian,HE Leisisi,CHEN Rui,et al. Active arc suppression method for single-phase grounding fault of power distribution network based on self-optimized control[J]. Guangdong Electric Power,2017,30(2):129-136.
- [35] 陈纛,陈坤懿,肖先勇,等. 负荷对接地故障转移消弧技术的影响[J]. 电测与仪表,2019,56(23):24-30.
CHEN Ying,CHEN Kunyi,XIAO Xianyong,et al. Effects of load on arc-suppression technology based on grounded-fault transfer device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2019,56(23):24-30.
- [36] 郭谋发,游建章,林先辉,等. 适应线路参数及负载变化的配电网柔性优化消弧方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(8):138-145.
GUO Moufa,YOU Jianzhang,LIN Xianhui,et al. Flexible arc-suppression optimization method for distribution network adaptable to variation of lineparameters and load[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(8):138-145.
- [37] 张毅,薛永端,宋华茂,等. 低阻接地故障有源电压消弧算法性能分析和改进[J]. 电网技术,2017,41(1):314-321.
ZHANG Yi,XUE Yongduan,SONG Huamao,et al. Performance analysis and improvement of active voltage arc-suppression algorithm about low resistance grounding fault[J]. Power System Technology,2017,41(1):314-321.
- [38] 陈锐,王文,翁洪杰,等. 配电网过电压有源抑制的注入电流控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(5):1-6.
CHEN Rui,WANG Wen,WENG Hongjie,et al. Injecting current control method for active overvoltage suppression in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2018,30(5):1-6.
- [39] 郭谋发,张伟骏,高伟,等. 基于级联H桥变流器和dq变换的配电网故障柔性消弧方法[J]. 电工技术学报,2016,31(24):240-251.
GUO Moufa,ZHANG Weijun,GAO Wei,et al. Fault flexible arc suppression approach based on cascaded H-bridge converters and dq coordinate transformation for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(24):240-251.
- [40] 李桓,彭克,张新慧,等. 基于IIDG电流相位控制的配电网故障电流抑制方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):180-186.
LI Huan,PENG Ke,ZHANG Xinhui,et al. Fault current suppression method for distribution network by controlling IIDG current phase [J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(9):180-186.
- [41] 林海,梁志瑞. 消弧线圈分散补偿单相接地故障运行特性分析[J]. 电测与仪表,2018,55(17):27-31,47.
LIN Hai,LIANG Zhirui. Analysis of single-phase-to-ground fault operation characteristic of arc suppression coil dispersion compensation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2018,55(17):27-31,47.

作者简介:



卫晓辉

卫晓辉(1983),男,博士,工程师,从事电网运行、配电网自动化等相关工作(E-mail:178625215@qq.com);

邵文权(1978),男,博士,教授,硕士生导师,研究方向为电力系统继电保护等;

程远(1985),男,博士在读,讲师,研究方向为模块化多电平功率变换器等。

Review of single-phase grounding fault active arc-suppression technologies in distribution network

WEI Xiaohui¹, SHAO Wenquan², CHENG Yuan^{2,3}, XU Jiapeng²

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Company Xi'an Electric Power Supply Company, Xi'an 710032, China;

2. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

3. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Various forms of new energy, a large number of power electronic users are more and more connected to the distribution network, which is the irresistible development trend of distribution network. It leads to more and more reactive, active and harmonic components in the single-phase grounding fault current. The passive arc-suppression technology with arc-suppression coil still has the problem of large reactive component, active component and harmonic component in the single-phase grounding fault residual current. The active arc-suppression technology with active intervention by external injection is an effective way to solve such problems. The research status of active arc-suppression technology for single-phase grounding fault in distribution network is summarized. The structure and control algorithm of active arc-suppression device are mainly described. Firstly, the hardware structure of arc-suppression device is analyzed from the aspects of cost, advantages and disadvantages, connection mode, etc. Secondly, the advantages and disadvantages of voltage arc-suppression algorithm, current arc-suppression algorithm and comprehensive arc-suppression algorithm are compared. Finally, the hardware structure and control algorithm of active arc-suppression technology are prospected, the possible problems and possible research directions are given.

Keywords: single-phase grounding fault; active arc-suppression; distribution network; converter; passive arc-suppression

(编辑 钱悦)

(上接第 25 页)

Online aggregation monitoring of low-voltage power load demand response capability based on non-intrusive load identification

ZHANG Tong¹, YU Heyang², TIAN Jiang³, FAN Haifeng⁴, CHEN Changyu², GENG Guangchao²

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

2. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. State Grid Suzhou Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suzhou 215004, China;

4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: The user side has a large number of load resources. The load has uneven capacity, scattered distribution, strong response potential and the ability to participate in grid regulation. Based on the difference in characteristics of power and current during load operation, a fingerprint database of load characteristics is established, and a non-invasive low-voltage load composition identification method for residential appliances based on a multivariate Gaussian model is proposed to achieve online decomposition of residential energy use. Based on the similar characteristics of similar electrical appliances, after obtaining the load actions and interruptible types of the bottom residents, an online aggregation monitoring method for the load demand response capability of the platform area from the bottom to the top is proposed. The REDD data set and the topology of a certain station area are used to test. The results show that the method has a better recognition of the residential load, and can better monitor the capacity of load resources participating in demand response. The method explores a way for participating in the intelligent utilization of system peak shaving and frequency modulation.

Keywords: non-intrusive; load identification; demand response; aggregation monitoring; online assessment

(编辑 吴楠)