

机器学习算法运用到电力系统继电保护

针对现有继电保护难以完全应用到含高渗透分布式能源电力系统的情况，将机器学习算法运用到电力系统继电保护。首先，分析了含高渗透分布式能源电力系统的结构、模型、故障特征和保护改进措施，阐述了继电保护算法所面临的挑战；接着介绍人工智能算法，重点分析机器学习算法的特点及其在电力系统的应用；最后，深入研究基于机器学习算法的电力系统继电保护，设计了具体的实现方法和实现流程。研究可为机器学习算法运用到电力系统继电保护提供技术支持。

熊玉倩 都洪基/南京理工大学自动化学院



熊玉倩/硕士研究生

0 引言

分布式能源接入电力系统后，原先的单向潮流方式转变成了双向潮流方式，改变了电力系统结构和潮流；尤其当分布式能源高渗透到电力系统后，电力系统的运行模式更加复杂，传统的继电保护方法难以完全应用于含分布式能源的电力系统中^[1-2]。

针对传统保护算法难以适用电力系统发展的情况，本文将机器学习算法运用到电力系统继电保护中。

1 继电保护新问题

1.1 分布式能源

随着煤炭资源的不断耗尽和煤炭发电带来的污染问题，光伏和风力等新能源发电成为了具有发展潜力的绿色能源模式，越来越得到各国的重视，各地依靠自身的地理、气候优势，因地制宜地发展各种形式的新能源发电，并接入主电网，与主电网供电互为补充^[3]。

新能源发电，由于受限于功率和电

压等级，通常组成微电网的形式，并经联络开关接入配电网中，如图1所示。微型燃气轮机、风力和光伏等新能源发电，直接产生的电能往往是直流形式，与当前配电网电能形式并不完全匹配，因此需经以电力电子元器件为核心的电能变换器进行转换成与所接入的配电网相匹配的电能。

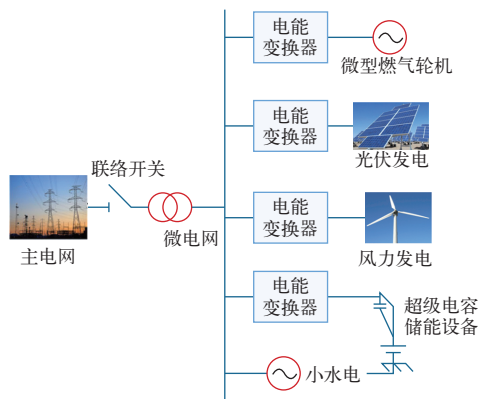


图1 含分布式能源的电力系统结构

由于新能源发电容易受约于自然环境，具有不稳定性、间歇性和波动性等特点^[4]，通常还配备超级电容等储能设备，在电力过剩时吸收多余的电能，并在电力不足时提供电能，从而维持电力系统的稳定。

传统主电网有相对固定的运行方式，潮流大小和方向较容易确定，这有利于电力系统继电保护的实现。而新能源以微电网形式接入主电网，使得电力系统运行方式更加复杂，增加了电力系统潮流分布的随机性和不确定性，使得传统的电力系统继电保护方法不一定完全适用，需结合分布式发电的模型进行深入分析。

关键词/Keywords

电力系统·
继电保护·
故障特征·
机器学习·

1.2 模型

构建含分布式能源的主电网简单模型，其典型示意图如图2所示，由两线馈线组成，直接与负荷相连，分布式电源通过一台变压器接入配电网，其接入位置可以为序号1~4的任意一条母线，断路器下方编号1、2、3和4分别为保护1、保护2、保护3和保护4。

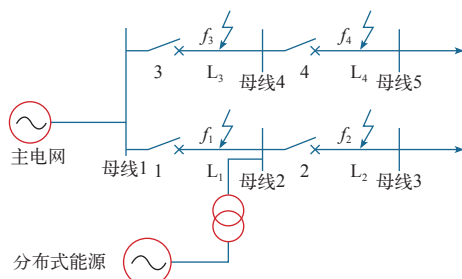


图2 含分布式能源的主电网简单模型图

其等效电路图如图3所示， E_s 为系统电源的等效相电动势； E_m 为分布式电源的等效相电动势，此处取 $E_s = E_m$ ； Z_s 为系统电源的等效阻抗； $Z_1 \sim Z_4$ 为各线路阻抗； Z_T 为与分布式电源相连的变压器短路阻抗； Z_m 为分布式电源的等效阻抗。以上参数均取标么值。由于配电网一般离系统电源的电气距离比较远，在最大运行方式和最小运行方式下的短路容量变化不大，故此处假设 Z_s 大小不变。

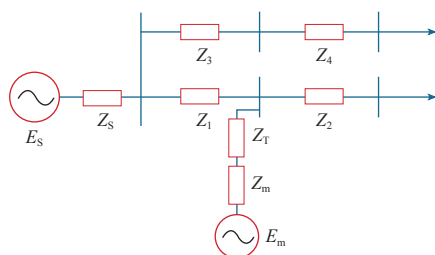


图3 等效模型

传统的电力系统三段式电流保护，即瞬时电流速断保护、限时电流速断保护和定时限过电流保护，是在单电源辐射性网络结构下针对相间短路故障而配置的。在分布式电源接入配电网后，会对配电网的短路电流产生影响，主要包括助增、汲流和方向短路电流等问题^[5]。分布式电源配电网故障电流注入能力决定了其对配电网继电保护影响的大小，其中各种分布式新能源类故障

电流注入能力，根据分布式电源的类型而有所不同，如下表所示。

表 不同类型分布式电源的故障电流注入能力

分布式电源类型	故障电流注入能力
逆变电源	100%~400%，持续时间取决于控制装置
同步发电机	500%~1 000%，几个周期后衰减到200%~400%
感应发电机	500%~1 000%，在10个周期内衰减至可忽略

此外，分布式电源的故障电流注入能力取决于其并入配电网后戴维南等效阻抗的大小，而分布式电源容量的大小决定了其接入等效阻抗的大小。分布式电源接入不同的位置也将影响故障电流的大小和流向。因此，分布式电源接入带来的影响主要取决于其电源容量的大小、类型和接入位置。

1.3 故障特征分析

本章节将研究上游线路发生短路故障、相邻馈线发生短路故障和下游线路发生短路故障三种情况下，含分布式能源的电力系统故障特征情况。

1.3.1 上游线路发生短路故障

假设线路 L_1 发生故障（ f_1 ）时，流过保护1和保护2电流大小分别为

$$I_{k1} = \left| \frac{E_s}{Z_s + \alpha_1 Z_1} \right| \quad (1)$$

$$I_{k2} = \left| \frac{E_s}{Z_s + Z_m + Z_T + Z_2 + (1 - \alpha_1) Z_1} \right| \quad (2)$$

考虑到在分布式电源接入前，线路 L_1 发生故障（ f_1 ）时，流过保护1和保护2电流一样，大小为

$$I_k^f = \left| \frac{E_s}{Z_s + \alpha_1 Z_1} \right| \quad (3)$$

由此可以看出，当上游线路发生短路故障时，含分布式能源的电力系统故障特征及其对电力系统继电保护情况如下所述。

1) 对相邻馈线保护影响。相邻馈线没有故障电流流过，所以不会引起相邻馈线保护的误动作。

2) 对上游线路保护影响。流过故障点的上游线路保护装置的故障电流不变，保护正常动作切除故障；分布式电源接入点与故障点之间的保护装置

置将有方向故障电流流过，可能导致其保护动作。

3) 对下游线路保护影响。下游线路没有故障电流流过，所以不会引起下游线路保护的误动作。

1.3.2 相邻馈线发生短路故障

当相邻馈线发生短路故障时，同理分析，含分布式能源的电力系统故障特征及其对电力系统继电保护情况如下所述。

1) 对相邻馈线保护影响。由于分布式电源的注入短路电流对流过相邻馈线保护装置的短路电流产生助增作用，提高其保护动作的灵敏性，同时其保护范围扩大，可能导致相邻馈线各电流保护动作失去选择性。

2) 对上游线路保护影响。上游线路的保护装置将有反方向故障电流流过，可能引起上游线路保护的误动作，使得分布式电源进入非计划孤岛运行状态，扩大停电范围。

3) 对下游线路保护影响。下游线路没有故障电流流过，所以不会引起下游线路保护的误动作。

1.3.3 下游线路发生故障

当下游线路发生故障时，同理分析，含分布式能源的电力系统故障特征及其对电力系统继电保护情况如下所述。

1) 对相邻馈线保护影响。相邻馈线没有故障电流流过，所以不会引起相邻馈线保护的误动作。

2) 对上游线路保护影响。由于分布式电源的注入短路电流对流过上游线路保护装置的短路电流产生汲流作用，降低其保护动作的灵敏性，其保护范围缩小，可能导致上游保护拒动。

3) 对下游线路保护影响。由于分布式电源的注入短路电流对流过下游线路保护装置的短路电流产生助增作用，提高其保护动作的灵敏性，同时其保护范围扩大，可能导致下游线路各电流保护动作失去选择性。

1.4 保护改进措施

分布式电源接入对短路电流的助增作用，可能导致配电网中保护装置的误动、拒动或动作失去选择性，因此采取相关改进措施。除了对分布式电源的接入位置和接入容量进行限制来降低短

路电流之外，还可以通过以下措施减小分布式电源接入对配网保护的影响^[6-7]。

1) 适当选择更高电压等级接入。配电网的电压等级越高，其短路容量越大，就可以容许短路容量较大的分布式电源。所以，对短路容量较大的分布式电源，应尽可能用较高的电压等级供电，但这可能会增大用户的投资，有时也会受当地电网具体条件的限制。

2) 加装方向元件。分布式电源的接入使原有的单电源系统变成了双电源或多电源系统，为了保证保护能够及时切除故障，可以在原有保护的基础上加装方向元件，当电流方向为负时保护动作切除故障。

3) 加装故障限流器(FCL)。FCL在系统正常运行时，对外阻抗为零，当线路中发生短路故障时，对外表现为高阻抗。可以在发电机出口处加装FCL，使得故障电流变化较小，网络中短路电流值在原有保护的整定值之内。

4) 加装以其他电气量为度量单位的保护，例如方向比较式纵联保护，即利用输电线路两端功率方向相同或相反的特征来判断是区内故障还是区外故障。

5) 分布式电源可以配置至少各一种主动和被动的防孤岛效应保护，使得分布式并入的配电网发生故障失压时，在规定的时限内与配电网断开，防止出现非计划孤岛运行状态。假如接入馈线原来装有自动重合闸装置，则可以在分布式电源并网处加装自动重合闸，与接入馈线的自动重合闸配合，构成具有同期检定和无电压检定的重合闸，一般系统侧检定无电压，分布式电源侧检定同期。

6) 合理调整并网变压器的中性点接地阻抗值。通过前面主要技术指标的分析，可以看出在单相短路时，合理地设置中性点接地阻抗值，可以减小分布式电源接入原有配电网保护的影响。

1.5 继电保护算法的挑战

分布式能源以高渗透方式接入主电网中，使得电力系统的保护模式也更加复杂，采取继电保

护的改进措施，虽然有助于降低继电保护的实现难点，但无法完全消除分布式能源对传统继电保护的影响，主要表现在以下几方面。

1) 分布式电源的接入会使得网络中的短路电流减小或增加，可能引起配电网保护误动、拒动或动作失去选择性。

2) 对于小电流接地系统，并网变压器应采用 Δ/Yg 联结方式，其中系统侧为 Δ 联结；对于小电阻接地系统，并网变压器应采用 Yg/Δ 联结方式，其中系统侧为 Yg 联结。其中，对于小电流接地系统，分布式电源接入对基于稳态特征故障检测算法的零序保护并不产生影响。

3) 分布式电源的类型、接入短路容量、并网位置以及并网变压器中性点接地阻抗都是分布式电源接入对配电网保护影响的重要因素。

含有分布式能源的主电网，改变了传统电网的电源分布和阻抗分布情况，经典的继电保护方法难以完全适应含分布式能源的继电保护^[8]，亟需在含分布式能源的电力系统继电保护等复杂应用中引入人工智能等先进算法，以提高保护的准确性。

2 机器学习法

2.1 人工智能算法

人工智能这一术语自1956年被提出，到电子计算机作为一种可以模拟人类思维的工具出现，使人工智能这一技术有了一个展现的平台，开始了探索与发展。1997年，IBM公司的“深蓝Ⅱ”超级计算机，击败了国际象棋卫冕冠军Gary Kasparov这一现象，标志了人工智能技术的一个完美表现，再到近些年的Alpha Go，表明人工智能的发展已经到了一个比较高端的程度^[9]。

人工智能技术是引领未来的创新性技术，且在国家经济以及互联网、大数据及超级计算机的发展之下，人工智能技术的发展也进入了具有深度学习、跨界融合、人机协同和群智开发自主操控等特性的新阶段。这些具有新特性的人工智能技术，将对人类的生产、生活乃至思维模式都产生重大和深远的影响。

人工智能发展的三个阶段分别为^[10]：①第一阶段的人工智能，也就是当前所处阶段，人工智能依然依赖于专家设置的体系结构，学习性也依赖于人工设计的算法；②第二阶段的人工智能，即为广义性的人工智能，广义性的人工智能可以选择性地通过不同的来源，而不是像现在一样依赖于标准的数据学习，并且广义性的人工智能可以进行长久性的终身学习，因为其特性给了它一个适应环境的能力，从而拥有自适应的构架来进行终身学习；③第三阶段的人工智能即通用人工智能，目前还没有一个具体严格的定义，普遍认为具有高度且极其强大的自主性，这是一个长期目标，需要长期的努力才能去实现。

人工智能可以与人类进行更自然的互动。特定的人工智能技术（例如机器学习、深度学习和自然语言处理）可以与强化的预测性分析和描述性分析相结合，并通过机器人技术及其他形式的自动化技术获得补充。

由于人工智能算法对于复杂系统具有较强的识别性，将人工智能算法应用到情况复杂和多样化的含分布式能源中，有望较好解决含分布式能源的电力系统继电保护故障识别难题，提高继电保护动作的准确率。

2.2 机器学习算法及其电力应用

作为人工智能的核心，机器学习（Machine Learning, ML）在处理复杂系统方面得到了越来越多的应用。机器学习作为一门多领域交叉学科，涉及概率论、统计学、逼近论、凸分析和算法复杂度理论等多门学科^[11]。机器学习等人工智能算法专门研究计算机怎样模拟或实现人类的学习行为，以获取新的知识或技能，重新组织已有的知识结构使之不断改善自身的性能。

机器学习依赖于优良的数据源，需要良好数据支撑。当前电力大数据和超强性能的计算机等技术迅猛发展，为机器学习提高了更大量、更优秀的训练方法，有利于利用机器学习以实现复杂的电力高级应用^[12]。

本文设计了基于电力大数据支撑平台的电力

机器学习算法高级应用。借助于电力大数据，为机器学习提供数据源，从而可以通过机器学习算法获得有效的继电保护等电力系统高级应用^[13]。

随着智能电网的发展，电力现场配备了更多的传感元件和各种类型的智能电子设备、智能电表等，智能电子设备和智能电表实时采集电力运行现场的电流、电压和开关状态等数据经预处理后，将通过通信网络，将所采集的数据送入电力大数据支撑平台中^[14]。

电力大数据支撑平台首先进行电力大数据汇集、电力大数据分析和电力大数据存储。一方面，将所存储的电力大数据存入到知识数据库中，并提供知识数据库查询、记录和诊断等功能；另一方面，将电力大数据汇集和分析结果也导入到机器学习算法中，结合知识数据库提供的经验，完成电力系统高级应用功能，如图4所示。

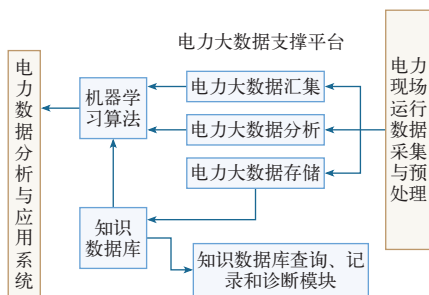


图4 基于机器学习算法的电力高级应用

大数据和机器学习算法等先进的信息处理和数据分析技术，解决了如何从海量的高密度电力数据中提取有效信息的难题。通过机器学习算法，可以在设备状态评价、整定计算、在线监视与智能诊断等方面，全面提升电力系统继电保护的技术水平，为有效解决含分布式能源的电力系统继电保护问题提供了有力的技术支撑。

3 基于机器学习算法的电力系统继电保护

3.1 实现方法

基于机器学习算法的电力系统继电保护，能充分发挥机器学习处理含分布式能源的电力系统继电保护多样化和复杂化的优势。机器学习算法，汇集了从知识数据库调用的继电保护训练数

据和从继电保护现场获得的实时运行数据，通过概率论、统计学、逼近论、凸分析和算法复杂度理论等算法，进行电力系统模型训练，重点分析含分布式能源的电力系统故障特征，如图5所示。

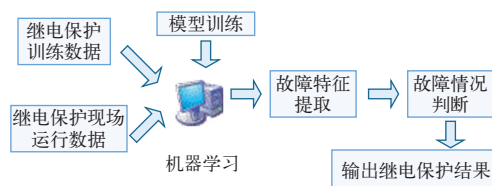


图5 机器学习算法运用到继电保护

基于机器学习算法的继电保护，可以实现含分布式能源的电力系统中，继电保护判断算法的自我学习和自动构建，避免了原有的人工分析或是单纯的阈值判断算法的缺陷，实现了继电保护的准确、动态分析，提高了现场异常处理的工作及时性和准确性，排除了数据的偶然性，提炼了数据的必然性，为含分布式能源下各种复杂的电力系统继电保护状态的识别和判断，提供了准确支持。

当然，机器学习算法应用到继电保护中，还处于一个不断发展的过程。机器学习算法过程中，需要对相应的参数进行调整，参数不断调整的过程可能需要耗费大量精力，而且调整的经验很难具有共性，需针对专门的电力系统状况作个性化的调整，这就导致了机器学习结果的可重复性大大降低，需要一个机器学习之外的技术来优化这些已经发现的问题。

3.2 实现流程

基于机器学习算法的电力系统继电保护应用流程如图6所示。首先收集电力系统电气量和开关量等与继电保护相关的信息，对信息进行预处理，剔除现场采集或通信网络传输过程中产生的有误信息。然后判断所汇集的信息是否足够用于机器学习算法，如果数据量还不够，则继续收集机器学习算法所需的继电保护信息；一旦机器学习算法所需的继电保护信息已经足够，则开始进行机器学习算法，提取继电保护所需的电力故障特征，并进一步进行继电保护识别。最后判断电力

系统是否发生了故障，若没有故障，则返回；若存在故障，则采取跳闸或告警等继电保护动作。

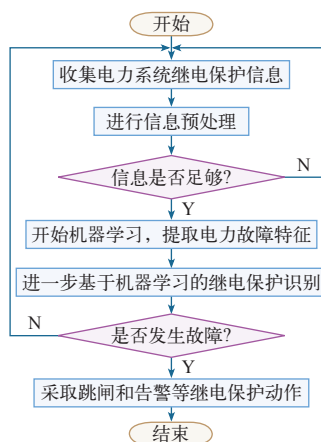


图6 实现流程

4 结束语

随着分布式能源高渗透主电网，电力系统运行愈加复杂，所面临的继电保护难度更大，本文将机器学习方法应用到电力系统继电保护中，并借助电力大数据方法为机器学习提供数据支撑，从而实现有效、可靠的电力系统继电保护。完成主要内容如下。

1) 分析了含分布式能源的电力系统模型、故障特征和改进措施，研究了继电保护算法上所面临的挑战。

2) 分析人工智能算法，尤其机器学习算法的特点，并研究基于机器学习算法在电力系统的应用情况。

3) 深入研究基于机器学习算法的电力系统继电保护，具体介绍了实现方法和实现流程。

参考文献

- [1] 许健, 赵春雷, 乔峰. 针对多分布式电源的孤网继电保护[J]. 电网与清洁能源, 2015(2): 82-86.
- [2] 袁超, 吴刚, 曾祥君, 等. 分布式发电系统继电

保护技术[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 99-105.

- [3] 赵上林, 吴在军, 胡敏强, 等. 关于分布式发电保护与微网保护的思考[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 73-77.
- [4] 边光瀛. 分布式电源对配电网继电保护的影响分析[J]. 电力安全技术, 2015, 17(5): 27-29.
- [5] 何龙, 舒朝君, 向家俊. 电流保护对分布式电源接入位置及容量的分析[J]. 电源技术, 2015, 39(5): 152-155.
- [6] 邹温冰, 姚福强. 分布式电源对配电网继电保护影响分析[J]. 电子质量, 2015(4): 77-82.
- [7] 田洪磊, 高博, 丁津津, 等. 含分布式电源的配电网故障及保护方案[J]. 上海电力学院学报, 2015, 31(4): 357-360.
- [8] 王菁, 邵如平, 穆秀云, 等. 含分布式电源的配电系统保护方案[J]. 电器与能效管理技术, 2012(10): 14-17.
- [9] 韩祯祥, 文福拴, 张琦. 人工智能在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 2-10.
- [10] 唐华锦, 陈汉平. 电力系统中的人工智能技术应用研究[J]. 电站系统工程, 2001, 17(4): 250-252.
- [11] 赵沁平, 魏华, 王军玲. 机器学习技术与机器学习系统[J]. 计算机科学, 1993, 20(5): 27-40.
- [12] 朱冲, 陈雪飞, 张聪品. 机器学习研究进展[J]. 福建电脑, 2015(8): 74, 129.
- [13] 严英杰, 盛戈峰, 陈玉峰, 等. 基于大数据分析的输变电设备状态数据异常检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 52-59.
- [14] 宋亚奇, 周国亮, 朱永利, 等. 云平台下输变电设备状态监测大数据存储优化与并行处理[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 255-267.

(收稿日期: 2018-01-05) **EA**