

低压电器智能化与智能电网

■ 陈德桂/西安交通大学电气工程学院

智能电网需要智能开关和先进的传感器支持，其中也包括低压智能化开关，本文从智能电网的角度，介绍低压电器智能化的最新进展，包括：为了保证低压配电线路供电的连续性和可靠性，低压选择型断路器的发展；智能化低压断路器的电能管理；建立经济、互动以及优质服务的配电与用电系统；用于新能源的低压开关电器；智能断路器的状态检测。

1 概述

当前为了保证电网的安全稳定运行，提高电能质量，充分发挥分布式清洁能源的使用，因而必须提高电网管理水平和效率，最大限度地利用信息技术，实现系统智能对人工的替代，这使智能电网（Smart Grid）成为国际和国内人们关注的热点。智能电网是一个完整的体系，它要涵盖发电、输电、配电、调度、变电和用电等各个环节，并且智能电网需要智能化的开关电器和先进的传感技术的支持，因而智能电网与低压电器的智能化有密切的关系，本文从智能电网的角度，介绍低压电器智能化的最新进展。



陈德桂 西安交通大学电气工程学院教授，博士生导师，全国电工技术学会荣誉理事，低压电器专委会主任，全国电器工业

协会通用低压电器分会专家组组长，IEEE高级会员，日本电子情报通信学会海外会员。1992年获得国务院政府特殊津贴。

1955年毕业于上海交通大学电机系。1983~1984年赴英国利物浦大学电气与电子工程系留学一年。研究领域为：电弧等离子体微观机理及磁流体动力学数学模型，低压电器灭弧室现代研发技术，开关电器特性的可视化仿真与虚拟样机技术，电器限流技术，智能化低压电器。在国内外发表了200余篇论文，作为本人低压电器新技术丛书中的两本专著“低压断路器的开关电弧与限流技术”（2007年）和“低压断路器的虚拟样机技术”（2009年）已由机械工业出版社出版。已完成本人主持的国家与省部级基金项目6项，国际合作项目10项。多次获奖，其中2004年获国家科技进步二等奖，2003年教育部科技进步一等奖和2003年西安市科学技术一等奖。（以上3个奖项陈德桂均排名第一）。已获发明专利4项，实用新型专利5项（均排名第一）。

积极开展国际国内学术交流，在国外的国际学术会议上多次被邀请作大会特邀报告；作为会议执行主席或会议主席主持和召开了第一~三届（1989、1993和1997年）电接触、电弧、电器及其应用国际学术会议。从1989年至今被8个国际学术会议聘为国际科学委员会委员。

2 低压配电系统的选择性保护与低压断路器

智能电网最主要目标就是要保证供电的可靠性与连续性，对低压配电系统来说实现这一目标的重要手段是采用选择性保护。国际电工委员会的IEC标准和我国国家标准按使用类别把断路器分成A类和B类两种类型，其中A类断路器在短路情况下，无明确指明其有选择性保护功能，而B类断路器则明确指明有选择性保护功能。图1表示低压配电系统前后级断路器安装位置（图1a）及其保护特性配合（图1b）。选择性保护是指当支路1发生短路时，仅下级支路断路器B2开断短路电流，而上级开关不动作，这就不会影响到其他支路如支路2和3的正常供电，因而选择性保护对提高低压配电系统的工作可靠性有重要作用。当前供电的连续性和可靠性日趋重要，无论是公共场所、生产企业和家庭电气设备，瞬间的断电会造成巨大的损失和生活上的不便，因而低压配电系统的选择性保护技术近年来有很大的进展。

如何实现配电系统上下级断路器的选择性匹配，这主要决定于两者保护特性的配合，一般上级断路器

采用有三段保护特性的选择型B类断路器。图1b为上下级断路器保护特性配合，其中上级主开关B1具有三段保护特性，即作为线路过载保护的长延时，短路情况下的短延时和瞬时三段保护。而断路器B2作为下级支路开关，仅具有长延时和短路瞬时两段保护特性。当支路1短路时，若短路电流为 I_1 ，则从图1b的特性配合来看，短路电流使断路器B2首先动作，而主开关B1由于短延时而没有动作，这就保证了其他支路，如支路2和3的可靠供电。

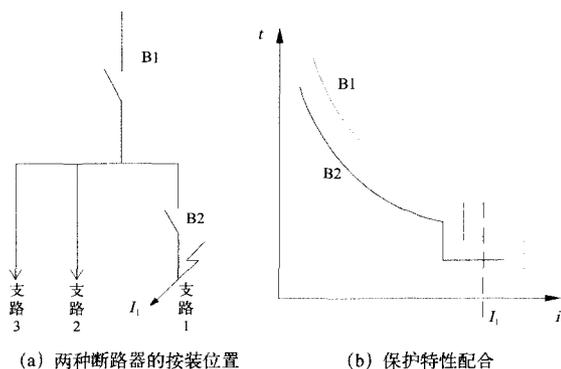


图1 选择性保护的特性配合

生产发展和人民生活水平的提高，低压配电系统的用电设备和分支回路日益增多，选择性保护变得越来越受到人们关注。当前选择性断路器的技术向以下几方面发展：局部选择性提升到全局选择性；低压配电系统的选择性保护范围从电源侧向终端侧延伸。

当两台上下级串联的断路器实现过电流保护时，在规定的条件下，下级断路器动作时不会引起上级断路器动作，这是选择性保护基本要求。而全选择保护是指当故障电流达到下级断路器最大故障电流时都能实现选择性。而局部选择性只是当下级断路器在规定的故障电流下才能实现选择性保护，因而局部选择性就存在一个选择性门槛，它是实现选择性保护的电流交接值，在此值以下，局部选择性保护可保证选择性，而在此值以上，则不能保证选择性。

图2为一带三段保护特性的选择型断路器的特性曲线，其中短延时的延时时间和瞬时脱扣器整定值都可调节，短延时的延时调节是用于让前后级断路器的动作时间匹配，实现选择性保护。而瞬时脱扣器整定值的调节，也就是调节选择性门槛电流 I_B ，确定上下级选择性匹配的电流范围，而这电流的极限值决定于断路器短时耐受电流 I_{cw} （一般取0.5 s）。如果上级选

择性断路器的 I_{cw} 低于它的开断能力（ I_{cu} 或 I_{cs} ），则即使是瞬时脱扣器的最大整定值可调至超过额定电流的10~12倍，但这种上下级匹配还是局部的。对上下级断路器实现全选择性的充分条件是让上级断路器的 I_{cw} 等于其开断能力，即 $I_{cw}=I_{cu}=I_{cs}$ ，这意味着瞬时脱扣器整定值可调至无穷大。对一般B类断路器通常采用电子式脱扣器，即可使瞬时脱扣器的整定开关处于打开位置，这种情况下，不论下级断路器是什么条件，都能实现全局选择性。

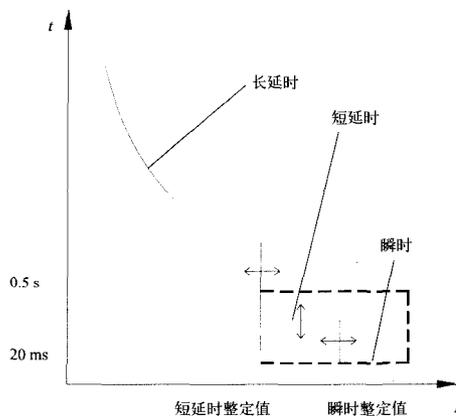


图2 带三段保护特性的选择型断路器的特性曲线

当然要实现全选择性也可从下级断路器着手，让下级断路器有强大的限流功能，当该支路发生短路故障时，它能使支路短路电流限制于上级断路器瞬时脱扣器整定值以下，也可实现全选择性。

为了达到 $I_{cu}=I_{cs}=I_{cw}$ ，作为选择型断路器主要类型的框架断路器目前采用各种新技术来实现全选择性保护，如国内外正在发展新型双断点框架断路器，或通过传统的单断点结构提高其补偿电动力来达到这一目标。

长期以来，低压配电系统的选择性保护一般只用于变压器出线端的功率配电系统。近年来由于工业生产和人民生活水平的提高，工控系统、公共场所和家庭用电设备和配电分支回路大增，因而负载侧和终端配电的选择性保护提到日程上来，不少国际著名低压电气企业推出相应的用于负载和终端侧的选择性断路器，例如施耐德公司最新推出的新型旋转双断点塑壳断路器NSX与老型号NS相比，其主要特点之一是额定电流为100 A的小规格断路器也带有Micrologic电子脱扣器，具有短路短延时保护，其延时调节范围为20~500 ms，短路短延时电流整定值和瞬时脱扣器整定值都可以调



节，它与用于终端的小型断路器Multi9配合可实现完全的选择性保护。老型号NS在小规格断路器中没有短路短延时功能，因而为了实现局部选择性配合，利用电流匹配原则，不得不把上级断路器的额定电流选大些。新系列塑壳断路器NSX可实现更为经济的选择性匹配，与微型断路器配合使完全选择性从100 A壳架电流就可实现。这一改进带来了很多好处：节省安装时间，无需过高选择断路器规格，使断路器和开关柜的尺寸变小。图3为新老型号配电系统的对比。

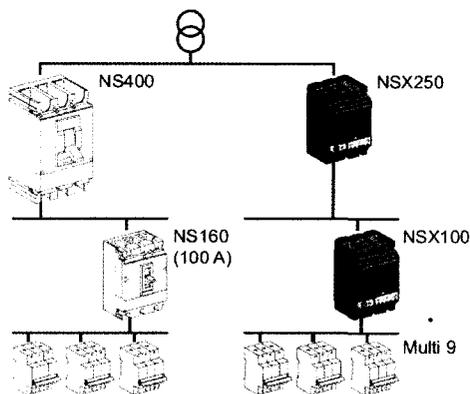


图3 施耐德公司新老型号配电系统的对比

为了进一步在配电系统的终端实现选择性保护，最近国内外相继开发出带选择性保护的微型断路器，它具有短延时保护功能，这一功能可以采用电子技术也可采用机械式短延时结构，图4为国内外目前开发成功的一种选择性微型断路器的结构和工作原理。

这种微型断路器依靠双金属片获得短延时作用，它由二个回路组成，主触头放置于主回路上，它可由操作机构操作，在短路故障下，由冲击电磁铁推动，辅助回路由短延时双金属片，限流电阻和辅助触头组成。断路器还有长延时双金属片作过载保护用。当短路电流通过时，冲击电磁铁打击主触头，使之断开。这时电流就转移到辅助回路，但辅助回路有限流电阻，使短路电流限至几百安培，短延时双金属片提供短延时作用，当后一级微型断路器限流开断，则复位弹簧使主触头重新闭合，使之不影响下一级其他分支回路供电。

若后一级微断路器不能动作，则经过短延时双金属片延时后，使断路器操作机构动作，同时打开主

触头和辅助触头。正常情况下，操作机构同时操作主辅回路触头的合分，由于正常运行时，辅助回路电阻大，电流主要通过主回路来导通。

这种选择性微型断路器当短路故障时只有短路短延时特性，因而相当于把瞬时脱扣器关断，所以它与后一级微断路器的配合是全选择性的，由于引入了限流辅助回路，使发生短路故障时，在开断过程中限制短路电流，以提高断路器对短路电流的电动和热稳定性。

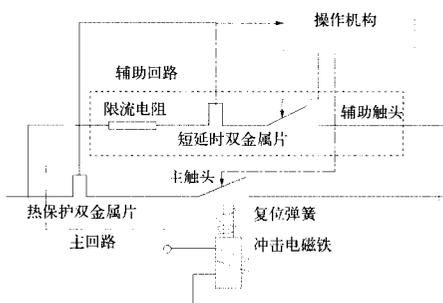


图4 一种选择性微型断路器的结构和工作原理

3 智能低压断路器的电能管理与优质服务

最近国家电网公司在天津所作“建设统一坚强智能电网”的报告中指出智能电网的主要特性包括：能够优化资源，提高设备资产的利用率和电网的运行效率；能够与电力市场和用户进行交互和实时响应，提升服务水平；能够以最优成本向社会提供优质电力。

这些特性体现在低压配电系统和智能化断路器上可理解为实现强有力的全面的电能管理，可实时监测能源损耗，提高电力质量，根据用户情况制定配电系统管理和维护计划，使配电系统的节能增效更深入和高效。

例如施耐德公司的新型塑壳断路器Compact NSX和框架断路器Masterpact为了建立强有力的基于网络的电能管理系统（见图5），首先加强了网络通信功能，并采用与Powerlogic监控系统相容的Modbus通信协议，接至网关MPS100的网络能够为4~16台设备服务，并通过网关MPS可将诸多网络接至上一级的局域网及互联网Internet。网关MPS具有两种功能，其一为将Modbus协议转换为TCP/IP协议，以便能访问局域网；另一功

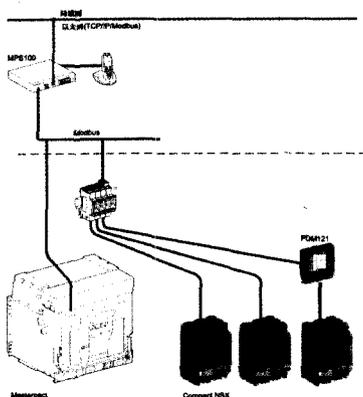


图5 智能断路器的通信网络

能可通过装载网页服务程序可显示设备提供的信息，即可查看断路器状态，以及配电系统功率和电量值，还可作为自动报警发布器及发送数据日志。

智能电网主要技术之一是采用先进的计量体系的技术与功能，即采用具有数字式计量、报警、液晶显示、可通信及息信存储等诸多功能的智能电表。新型的塑壳断路器Compact NSX的Micrologic智能脱扣器具有多参数电能测量功能，由内置的微处理器进行数据处理，用户可在脱扣器的液晶显示屏Micrologic LCD上，查看保护设置和电力参数的测量值，它还具有通信功能，可与上级网络通信。可测量数据包括：电压、电流、频率、功率和谐波畸变率，并可显示故障电流值。在智能断路器的电能管理系统中，还带有一柜门显示单元FDM121，可安装在配电柜的柜门上，它除了可以显示脱扣器显示屏所显示信息外，还可显示需求量、电能质量和最大值和最小值，以及故障报警、历史日志和维护指示等信息，其中需求量的测量是可在一个时间区间内计算所需电流值和功率值，以提供用电趋势、负荷预测等，为卸载和重新加载提供依据，以便进行负荷调整。

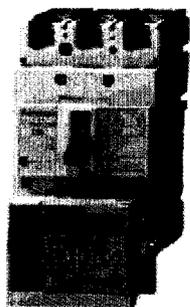


图6 三菱公司装于塑壳断路器板面的MDU单元

和施耐德公司类似，日本三菱公司的智能断路器也有基于通信网络的电能管理系统，也带有专门的测量显示单元MDU (Measuring Display Unit)，图6为可装于塑壳断路器板面的MDU单元。

智能电网的重要目标是要建立经济、互动和优质服务的配电与用电系统，这就要求实现以电力为中心的能源、通信和信息综合性增值服务。上述的电能管理系统只是在一定范围内实现了低压电器元件和配电系统的联系和综合，随着低压元器件和配电系统通信功能的增强，西门子、ABB等公司还推出了全局性、系统性的解决方案，提供从系统设计，到设备的选用、采购，直至运输与安装的一体化服务，实质上整合了设计院与制造厂商的职责。出于对自己产品的深入认识，可以使方案设计更合理、高效，大幅度提高系统安全性、可靠性与效率，也符合国家节能增效的整体战略。

例如：西门子公司提出了“综合电力 (Integrated Power)”的新概念，它把ACCESS™电能监测系统、低压开关柜、电动机控制中心、母线和电力变压器综合在一起，这种综合还包含制造厂对用户的综合服务，即从系统的初始规划、设计、运输、安装、开车和投产连接起来，做全面服务，给用户最大的方便。ACCESS™是一种基于Web的电能监控系统，它提供实时企业级电力质量和工作可靠性监控。ACCESS提供最新电力质量监控的硬件和软件技术，从这个系统可获得大量的系统级数据信息，供分析、储存和共享。由于ACCESS是基于Web的，所以用户可以在任何地点、任何时间，方便的存取数据。

ABB公司也提出了一个类似的总体解决方案，称为工业IT，使新型的Emax框架断路器、Tmax塑壳断路器和其他产品都作为一个完整解决方案的一部分，每个功能单元可执行测量、控制、优化和相互协调、配合等功能，并为用户提供安装、使用及维护指导，实现产品到用户服务综合解决方案。ABB公司新推出的Emax框架断路器有很强的通信功能，它的通信模块PR120/D—M可连接Modbus网络，通信系统中BT030装置可与笔记本电脑用蓝牙技术进行通信。EP010—FBP作为一个总线插接件，采用ABB Fieldbus plug新概念，象一个插座，可以选择连接到Profibus、Device Net或AS—I总线网络。

4 用于新能源的低压开关电器

智能电网要充分发挥分布式清洁能源的作用，为了这一目标，国际上也相应开发了用于清洁能源的特种开关电器，例如ABB公司最近推出了用于保护光伏电池串的高性能微型断路器S800PV-S。光伏电池串的工作与一般电源不同，当电池串某一单元短路时，它的短路电流与正常工作电流相比，数量上的不多，因而不适于用普通过载方式来保护，而当阳光强时，它的工作电流会很大，也不适合用瞬时脱扣器来作为短路保护。保护光伏电池串主要是保护逆向电流，如图7所示，当某串中一单元电池短路时，各正常工作的其他各电池串会向发生故障的这一串提供逆向电流，这时微型断路器应跳闸起保护作用。ABB公司开发的微型断路器额定电压至直流1 200 V，额定电流至125 A，开断电流 I_{cu} 为5 kA。

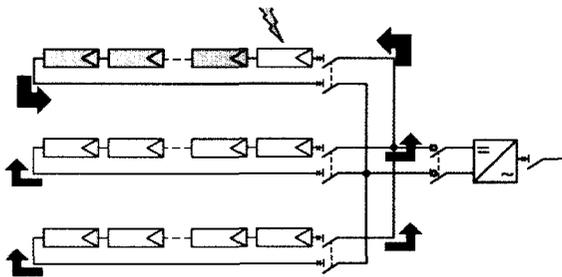


图7 光伏电池串发生故障时的逆向电流

5 智能开关的状态检测

智能开关是智能电网中一个重要元器件，它的可靠运行直接关系到电网的安全可靠，因而开关的状态检测十分重要。

当前一些新型低压智能断路器都带有一定状态检测功能，例如日本寺崎公司的Tempower系列的新型双断点框架断路器可检测触头温度，施耐德公司低压断路器的智能脱扣器Micrologic能检测触头磨损。这些检测技术需要采用各种新的传感技术，特别在中、高压断路器上，状态检测更显重要。

这里介绍施耐德公司推出的无线温度传感器，它用于中压断路器触头工作的状态检测。断路器的触头随着使用时间推延，会因表面接触情况变差而造成故障，因而对触头温度的长期检测十分必要。

采用无线技术的优点是：节省电缆和接线，降低安装费用；可用于移动设备和操作人员不易进入的场

合。微型无线温度传感器安装在主断路器的指式触头和开关柜的内壁上，后者是为了测量开关柜内的环境温度，所有的温度信息无线传输给读取装置，然后由微机进行处理，读取装置和微机都放在距离断路器300 m的控制室内。这套装置有两种用途。

一种是在正常运行中，由于各种原因发生突然触头温度升高，维护人员获得系统警报后能及时处理。

另一种是通过获得的长期检测信息，进行分析和综合后，提出最佳的维护方案。施耐德公司这套系统在美国几个发电厂中运行多年，取得了实际效果，一个实例是某电厂安装仅一个月就测得断路器触头过热的故障信息。

如图8a下部的环境温度曲线，随机已达60℃，这促使断路器指式触头的温度瞬间高达100℃，如图8a上部触头曲线所示，已接近中压断路器载流部分的最高温度（105℃）。根据测量结果，分析得出的原因是开关柜内通风不好，然后，在开关柜上开了两个通风口就解决了问题。图8b显示了改进后的环境温度平均下降了10℃，而相应的触头温度也得到了降低，使断路器运行在良好的环境中。

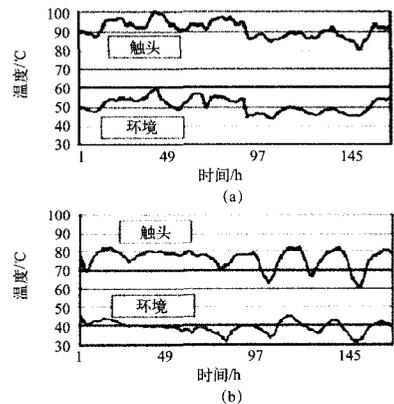


图8 开关柜改进前后的温度检测

6 结束语

智能电网的发展推动了低压配电网和低压电器的智能化，今后新型低器电器的开发，一方面会进一步和电网的智能化要求联系起来。

另一方面会与新能源的推广相结合，不但要保证配电网的工作可靠性和连续性，也要通过智能技术提高自身的工作可靠性。EM

(收稿日期：2010.01.20)