

有源配电网中的断路器应用研究

管瑞良, 刘洪武

(常熟开关制造有限公司(原常熟开关厂), 江苏 常熟 215500)

摘要: 为解决有源网络的保护问题, 对相关的断路器应用技术进行了研究。通过对电弧更有效的控制, 实现直流断路器的开断能力与极性无关, 使其满足光伏发电系统的保护需求。通过将真空灭弧技术与 ACB 操作机构相结合, 提高断路器在 AC690~1140 V 电压下的开断能力。通过对操作过程的有限元分析和优化设计, 提高断路器的操作寿命, 使其满足风力发电系统的保护需求。通过采用方向性的区域选择性连锁技术, 解决了多电源系统中的选择性保护问题。运行经验表明, 上述工作有效提高了有源网络运行的安全性。

关键词: 有源网络; 断路器; 应用研究

Application study on low voltage circuit breakers used for active electric network

GUAN Ruiliang, LIU Hongwu

(Changshu Switchgear Manufacturer Co., Ltd., Changshu 215500, China)

Abstract: The relevant technologies of the low-voltage circuit breaker are studied to solve protection problem in the active electric network. By controlling arc motion efficiently, the breaking capacity independent of polarity is improved to satisfy the protection demand of the PV generator system. By combining vacuum arc extinguishing technology and ACB operating mechanism, the breaking capacity of the circuit breaker is improved at the AC voltage range of 690-1149 V. And FEM analysis and optimization of operating mechanism are studied to increase the life of the breakers, which can fit protection demands in the wind turbine system. Based on directional ZSI (zone selective interlocking) technology, selective protection can be realized in the electric network with multi power sources. Application experience of the low voltage circuit breakers shows that above works can greatly ensure the operating security of the active electric network.

Key words: active electric network; low voltage circuit breaker; application study

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0127-04

0 引言

有源网络(Active Network)指的是分布式电源高度渗透、功率双向流动的配电网。所谓“高度渗透”是指接入的分布式能源对配电网的潮流、短路电流产生了实质性的影响,使得传统配电网的规划设计、保护控制、运行管理方法不再有效。

微网(Micro-Grid, MG)是一种典型的有源网络,根据 CERTS(the Consortium for Electric Reliability Technology Solutions)给出的定义,微网是由分布式电源、负荷、储能装置、控制系统组成的一个小型配电系统,是一个可以自治的单元,可在孤岛模式与并网模式间无缝转换。由于微网能够合理接纳可再生能源,并且可在孤岛运行和并网运行两种模式之间无缝转换,具有很高的使用灵活性,因此具有重大的社会经济意义,目前其应用日趋受到重视^[1-3]。

新能源的接入和网络拓扑结构的改变给配电网的保护控制、运行管理提出了新挑战。断路器在配电网中承担设备和线路保护的作用,而有源网络的发展,无论是在新型发电系统保护的的特殊性,还是在双向潮流条件下的选择性,都对断路器的性能及功能方面提出了新的和更高的要求^[4-5],本文将就断路器因此出现的新发展以及有源网络中断路器的应用进行讨论。

1 新能源对断路器的性能与功能需求

有源配电网中最典型的分布式能源形式是太阳能光伏发电和风力发电,另外还通常配备柴油发电机组,这些电源和传统低压配电网中的单一电源(变压器)有很大差异,其对保护断路器相应提出了新的要求。

1.1 用于太阳能光伏系统的直流断路器

光伏电池组首先将光能转化为直流电能,再经

逆变器转换为交流。从电池组串到逆变器直流侧，均需要直流断路器实现保护，由于光伏组件特殊的伏安特性及系统拓扑特点，对光伏系统直流断路器提出了特殊的要求。

光伏系统中电池组串通过汇流箱并联后接入逆变器，其拓扑结构决定了其可能出现两种方向的故障电流：在电池组串的输出侧发生短路时，故障电流方向与正常电流一致，可称为正向电流；而当电池组串内部发生短路时，其他并联组串将会向故障组串倒灌电流(如图 1 所示)，某些情况下逆变器中与直流母排并联的电容器组放电也可能产生倒灌电流，此时故障电流方向将与正常电流方向相反，可称为逆向电流。

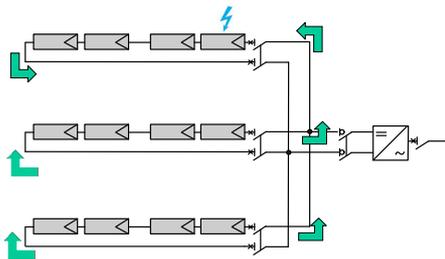


图 1 光伏组串中发生的逆向电流示意

Fig. 1 Schematic of reverse current in P-V system

正因为如此，光伏系统中使用的直流断路器，除了需要具备正方向电流的分断能力，还需要具备故障情况下的逆向电流分断能力，这就是开断能力极性无关的要求。

传统的直流断路器通常使用永久磁铁或吹弧线圈增强对开断电弧的磁驱效果，以弥补开断电流较小时自励磁场的不足。如果使用了磁场方向固定的永磁驱弧，只能开断指定方向的直流电流，对逆向电流没有开断能力，无法满足光伏系统要求。而如果使用吹弧线圈技术，则存在产品体积大、成本高的缺点。

为满足光伏发电系统保护的需求，发展具有开断能力与极性无关并且经济性能高的直流断路器具有现实意义。目前较为可行的方式之一是在传统交流断路器的基础上进行改进后，通过多级串联的形式派生出直流断路器。

这一方案的技术关键在于，通过增加对开断电弧、特别是临界电流条件下的小电流电弧的驱控效率，有效提高电弧的伏安特性，从而获得无极性的开断能力。CM3DC 系列断路器是这一技术形式的典型代表，其继承了 CM3 系列交流断路器成熟可靠的优点，并最大限度实现零部件通用，大大降低了产品成本，为光伏系统保护提供了一种经济可靠的解决方案。

1.2 用于风力发电系统的专用断路器

风力发电机出于效率成本的考虑，通常采用 AC690~1 140 V 的电压等级，这一电压等级高于传统配电网通常使用的 AC400 V。并且由于风力发电机具有并网要求，保护用断路器不仅需要考虑发生短路时风机自身的短路电流，还需要考虑电网的短路电流，因此对这一电压等级的分断能力要求远高于传统断路器。

为了提供满足风力发电所需分断能力的断路器，通常采用两种技术路线，一种是在传统配电网断路器的基础上进行改进，提高在 AC690 V 电压等级下的分断能力，其主要的关键技术是对开断电弧的有效驱控；另一种是将真空开断技术应用于这一领域，采用低压断路器的操作机构与真空灭弧室配合，开发新型的断路器应用于 AC1140 V 及以下场合(见图 2)，涉及的关键技术包括真空灭弧室的小型化及机构与灭弧室之间的动力学匹配。上述无论哪种技术方案，均涉及复杂的电弧磁流体动力学和多体动力学分析工作，具有较高的技术含量。CW3V 系列断路器是第二种方案的代表性产品，不仅能适用于更高的电压等级，而且由于触头系统处于密封的真空灭弧室内，因此具有良好的环境适应性，在风电领域具有独特的优势。

除了分断能力的要求，风力发电系统还对断路器提出了其他一些要求^[6]，例如：对于直驱型发电机，电源频率会随风速发生变化，相应的保护断路器也需要在较宽的频率范围(例如 10~200 Hz)内均具备可靠的保护特性和开断能力，CW3F 系列宽频型断路器正是代表这一发展方向的典型产品。



图 2 具有 AC1 140 V 开断能力的 CW 3 V 真空断路器

Fig. 2 CW 3 V vacuum circuit breaker use in AC 1 140 V system

另外，风力发电机可能需要在并网和离网模式之间进行较频繁(一天数次)的切换，而目前断路器的操作寿命难以满足需求，一些场合只能采用接触器来进行切换。由于采用了接触器，不仅增加了设备投入，还需要验证接触器与断路器之间协调配合额定限制短路电流 I_Q ，为选型带来困难和限制。因此，

如果能够开发操作寿命足够高的断路器兼顾切换功能, 不仅可以减少设备投入, 还能从根本上避免 I_q 配合要求带来的各种限制和风险, 因此高寿命断路器也是一个重要的发展方向, CW3R 系列断路器, 目前已获得超过 3 万次的操作寿命, 并仍在努力进一步提高操作寿命, 在这一领域具有显著的应用优势。

1.3 有源网络中小型发电机组的逆功率保护

在传统供电模式下, 小型自备发电机通常用作备用电源, 在停电时作为单一电源为重要负荷供电, 不存在逆向功率问题。但是在多电源系统中, 发电机组作为备用电源投用时, 仍可能与其他分布式电源构成多电源系统, 在此情况下如果发电机驱动不足, 则可能使发电机变为电动机状态运行, 这对发电机组将造成严重损坏。

解决这一问题的关键在于采用逆功率保护, 其基本原理是: 通过断路器对电流电压的同时监测, 当功率的流向和设定功率方向相反, 且大于动作阈值整定值, 并超过动作延时(定时限动作), 断路器跳闸或发出报警信号。如此后电路中的功率小于返回阈值整定值, 并超过返回延时(定时限动作), 断路器解除报警信号。

目前国内市场上的 CW3 系列断路器是具有逆功率保护功能的产品, 该产品由于同时对电流电压进行检测, 因此能够派生出丰富的电力参数检测功能, 例如谐波监测、电能管理等, 具有较高的智能化水平。

2 有源配网中的选择性保护

所谓选择性保护, 是指在供电线路发生故障时, 仅将故障支路从电网中切除并隔离, 而不影响其他回路的正常供电。

传统配电网通常是单一电源为中心的辐射状结构, 通过各级断路器之间的保护特性合理设定, 依靠电流选择性和时间选择性即可实现选择性保护。而在有源配电网中, 由于存在多电源的特点, 传统的保护方法难以实现选择性, 其保护策略将复杂得多。

为说明这一问题, 先引入一个双电源环形供电的例子, 如图 3 所示的环形供电网络中, 当发生短路电流时, 短路电流会通过所有的断路器, 为了最大限度减小停电范围, 理想的情况是仅断开故障点两侧的断路器。但由于断路器处于环形网络中, 无法依靠传统的梯级延时方式实现选择性。

为了实现选择性配合, 断路器需要具备潮流方向的检测功能, 以判断短路电流发生于自身的哪一侧, 并按照不同的方向分别设置两种特性, 断路器之间分别向两个方向设置为阶梯延时特性, 从而实现双电源系统中的选择性保护, 这就是方向性的选择性。

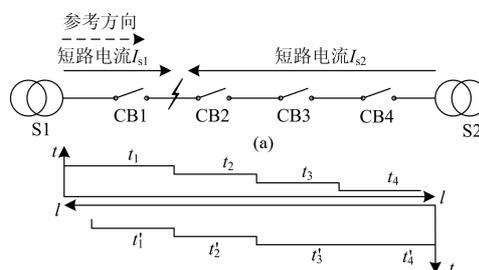


图 3 方向性保护在环形网络中的应用示意

Fig. 3 Directional protection used in ring network

在拓扑结构更为复杂的有源配电网中, 可能同时接入网络的电源数更多, 仅靠潮流方向难以实现选择性, 在此情况下还需引入一种利用断路器之间进行实时通信的选择性保护技术: 区域选择性联锁 (Zone Selective Interlock, ZSI)。

所谓区域选择性联锁是指当断路器检测到短路电流时, 即向上级断路器发送一个逻辑等待信号。若上级断路器在约定时间内未接到等待命令, 则立即使脱扣器动作使断路器断开; 若接到下级断路器的逻辑等待信号, 则延时脱扣等待下级断路器切断短路电流, 从而在实现选择性的同时, 大大降低了可能的故障持续时间, 如图 4 所示。

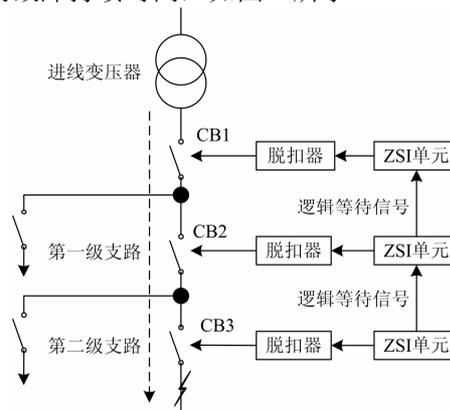


图 4 区域选择性联锁 ZSI 原理示意

Fig. 4 Principle schematic of ZSI

要在多电源系统中实现选择性保护, 需要将区域选择性联锁 ZSI 技术和方向性保护技术相结合, 不仅需要断路器自身具备潮流方向的检测功能, 还需要通过断路器之间的实时通信才能实现选择性保护, 这就是方向性的区域选择性联锁技术。

图 5 是根据国际大电网组织(CIGRE)关于低压微网定义的一个简化模型^[2], 配电网中包含了主变压器、太阳能电源 PV、风力发电机 WT 及燃料电池 FC 等电源, 并包括四台断路器 CB1—CB4。为实现选择性保护, 所有断路器均具备潮流方向检测功能, 并且具有 Fi(Forward input 正向输入)、

Fo(Forward output 正向输出)、Bi(Backward input 反向输入)及 Bo(Backward output 反向输出)四个通信端口, 每台断路器均通过上述四个端口与相邻支路的断路器实现通信。

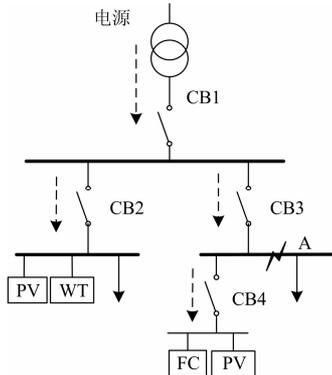


图5 方向性区域选择性联锁在微网中的应用示意
Fig. 5 Directional ZSI used in micro-grid

图中虚线箭头标示该网络中预先定义的能量流动参考方向, 实线箭头表示负载或者网络扩展。当系统的负载 A 处出现故障时, 临近故障点的保护装置 CB3 所流经的能量为正向, 由其 Fo 口发送“锁定”信号至相邻保护装置 CB1 的 Fi 口和 CB2 的 Bi 口, 而 Bo 口不发送信号; 保护装置 CB4 所流经的能量为反向, 对外不发送任何信号。如此, CB3 和 CB4 在规定时间内没有接收到“锁定”信号后执行瞬动保护, 远离故障的 CB1 和 CB2 启动预置的延时, 从而实现只将故障区域从系统中隔离, 其余部分维持正常工作。

上述例子说明了有源网络中如何通过方向性的区域联锁实现选择性保护, CW3 系列断路器是具备方向性区域选择性联锁功能的典型产品。需要指出的是, 在故障条件下断路器可将故障支路切除, 但其动作结果可能将配电网络解列, 解列后的各部分电路是否能够平稳运行, 很大程度上取决于电源与负荷功率是否匹配^[7-8], 需要在网络规划初期就考虑电源与负荷之间的匹配与优化, 是一个系统问题。

3 结语

有源配电网的发展, 对断路器技术的发展提出了新的要求, 推动了断路器技术的发展。但应该看到的是, 断路器本身只能通过分合闸操作改变网络的拓扑结构, 并不能完全解决有源配电网的所有保护问题。有源网络的安全可靠运行, 需要从系统的角度优化考虑, 需要相关行业的共同努力。

参考文献

[1] 杨琦, 马世英, 李胜, 等. 微型电网运行及控制设计[J].

电工技术学报, 2011, 26(1): 267-273.

- YANG Qi, MA Shiyang, LI Sheng, et al. Design of microgrid operation model and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 267-273.
- [2] 沈沉, 吴翔宇, 王志文, 等. 微电网实践与发展思考[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 1-11.
SHEN Chen, WU Xiangyu, WANG Zhiwen, et al. Practice and rethinking of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 1-11.
- [3] 黄文焘, 邵能灵, 范春菊, 等. 微电网结构特性分析与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 149-155.
HUANG Wentao, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Study on structure characteristics and designing of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 149-155.
- [4] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.
LI Wen, YANG Huixia, ZHU Bin. Survey on key technologies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 152-155.
- [5] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of micro grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [6] 陈哲. 配电系统中的风力发电[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 1-14.
CHEN Zhe. Wind power in electrical distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 1-14.
- [7] 张勇, 吴淳. 分布式发电机在配电网中的优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 33-37.
ZHANG Yong, WU Chun. Optimal placement of DG unit in distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 33-37.
- [8] 陈春, 汪泓, 黎灿兵, 等. 含分布式风电的配电网预防性重构[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 172-177.
CHEN Chun, WANG Hong, LI Canbing, et al. Preventive reconfiguration of distribution networks with distributed wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 172-177.

收稿日期: 2014-07-20; 修回日期: 2014-11-12

作者简介:

管瑞良(1968-), 男, 研究员级高级工程师, 长期从事低压断路器的理论研究, 并组织实施新产品研发工作;

刘洪武(1974-), 男, 高级工程师, 从事低压电器的基础理论研究、计算机辅助设计及新产品研发工作。E-mail: jds13@mail.xjtu.edu.cn