

通过有选择性的电弧光保护能减轻弧光的危害和降低成本

L. Kumpulainen, S. Dahl
Vamp Ltd, Finland

马永真
上海代表处

1 摘要

本论文描述了弧光故障的产生和特性，并给出了现寸弧光保护方法的概括。方法包括了如限弧开关柜，母线差动保护，区域选择互锁，限流装置和基于光纤感应的保护。提出了评估方法的标准。首选的双重感应方法会详细解释。电流方法来防止弧光事故并且提出了现有的快速弧光消除器。

2 引言

弧光故障同时产生了人员危害和重大的经济损失，由于设备和损坏和供电的中断。这些危险的意识最近有明显的增长，并且提出了减轻又弧光事故带来的后果。本论文总结了电弧光故障的特性和由此产生的后果，比较了不同的保护方法并提出了一个快速，有选择性的弧光减轻技术。

3 弧光故障

3.1 弧光故障的原因

大多数开关柜内的弧光故障是由人为错误产生的。进入带电盘柜或区域，粗心地使用工具或留下临时的接地线等通常的操作错误。其它典型的弧光故障原因是不紧密的连接、不够的机械尺寸、设备误动、污染或绝缘的下降，和动物。

3.2 电弧光特性

弧光故障是通过电离的气体（空气）在带电体和地之间或带电体之间的短路。高能量的电弧光故障表现为电气爆炸。它们释放了大量的能力，以辐射、热、强光和高压波的形式。电离空气的温度能达到20,000 K。温度的增加使空气膨胀产生了压力波。因为高温，回路元件能改变其物理状态，从固态到气态。如铜能在气态下膨胀67,000倍，增大了相当多的压力。此外，由辐射、热和压力波产生的危险会发散并产生有毒气体，导致额外的人员伤害。 [1], [2]

大多数弧光故障开始时是单相接地故障并且发展为三相故障。这强调了早期弧光故障检测的重要性，是为了快速的切除故障。

弧光电流不同于其它故障电流，因为弧光阻抗。因为电弧光或多或少是不可预测的，不能给出精确的弧光阻抗和电流值。标准中的计算公式是基于大量的实验数据。弧光电流总是小于其它故障电流[3], [4]。尤其在低压时，弧光电流小于其它故障电流的半波值。这是重要的来注意低的故障电流会导致长时间的故障清除并带来高风险和危害。高弧光电流和低弧光电流这两者同时是危险的。

3.3 弧光故障产生的危险和伤害

从上面描述的弧光特性看，人员伤害的风险是非常高的。估计如在美国每天有1-2 人死于弧光事故 [5]。

对设备的重大伤害，可能最大的是开关柜的整个破坏。除了直接的修理成本外，弧光故障的间接成本，生产停止、对用户的补偿等将会很高

弧光故障的结果依赖于事故的能量。事故能量定义为电弧光产生时从源来的确定距离，压在一个表面的能量总数。因而四个因素决定能量：距离，电压，电流和时间 [1]。

4 弧光保护

4.1 弧光预防

由于人为错误是大多数典型弧光故障中的一个，教育，培训和工作程序是一个重要的和划算的方法来预防故障。更多针对弧光预防的技术方法是预防设备的维护。大多数发展的方法是在线监视系统。局部放电的在线监视系统，尤其在电缆室，还不能广泛的执行，但是是一个潜在的方法。红外线和紫外线检测系统也被建议来用于开关柜的在线监视。设备的在线监视能减少由于设备故障产生的故障数量，但是不能防止由人为错误产生的弧光事故。

电流的在线分析建议用于防止弧光故障检测在一些科学论文上[6], [7]。这些研究的焦点是谐波频谱的变化是否是预防弧光检测的基础。

发展故障能够在早期通过烟气检测器检测。当检测器连接到保护装置时,在某些情况下能防止弧光和避免严重的危害。

系统接地对接地故障的幅度有影响。因为许多弧光故障开始时是单相接地故障,有低接地故障电流的系统能减少严重弧光故障事故的概率。一些研究人员为了安全原因推荐对低压系统用高阻抗接地[8]。高阻抗接地系统,在中性点和地之间有阻抗主要用于低压系统。对相间故障,直接接地和高阻抗接地系统不区别。

4.2 机械保护方法

4.2.1 限弧开关柜。限弧开关柜在操作者和故障间提供了一个机械屏障,并且把弧光爆炸能量改变方向,远离操作者[9]。装置或者能或者不能在内部故障中幸免[10]。这意味着停电将会很长。从安全的观点,限弧开关柜对人员提供保护,只要开关柜门关上。然而,在实际上打开柜门非常普遍,并且有伤害发生[11]。

4.2.2. 远方控制和操作。增加到危险设备的操作和监视的距离是提高安全的选项之一。可通过远方控制技术来实现,因此开关能在危险区域外操作。

4.3 通过限制故障电流减少事故能量

弧光的事故能量依赖于电压、电流和时间。当思考如何消除弧光时,系统电压通常不能改变。另一方面,可限制故障电流。

4.3.1 变压器大小和限流电抗器。系统阻抗能通过选择变压器和限流电抗器来增加。增加系统阻抗的缺点是增加损耗和成本。

4.3.2 故障电流限制器。在某些情况下基于烟火故障电流的限制器能用于限制弧光电流。

4.3.3 限流熔丝。一个所知技术是使用限流熔丝来限制弧光电流。当电流足够高时,限流熔丝在电流过零点前熄灭内部弧光。这缩短了弧光的持续时间,减少了能量。限流熔丝只有在非常高的故障电流时动作[10]。当限流熔丝在其限流范围内不能动作时,清除时间将会相当长[1], [12]。实际上,低电流能导致高的事故能量水平。

当进行弧光故障风险分析时,同样分析高的和低的故障电流。由高故障电流产生的风险是明显的,但是低故障电流能带来问题,因为低电流能导致保护装置和熔丝的长时间动作,导致长的燃弧时间。事

实是低电压状态下的弧光电流常小于其它故障电流的一半,应该引起重视。

4.4 通过减少燃弧时间来减少事故能量

快速继电器是常用的最简单的方法来减少施工能量。因为常规保护通过减少动作时间来加速是不够的,需要专门的保护。这有几个方法来减少燃弧时间。在下文中,大多数常用方法的主要特性简短描述。

4.4.1 母线差动保护。母线差动保护是相当快速的方法(典型的跳闸时间是1-2周波,15-40ms)用于母线保护。高阻抗母差保护是非常昂贵的,因为需要专用的电流互感器和额外的接线。装置测量穿过内部阻抗的电压,并且如果电压大于启动值,保护跳闸。

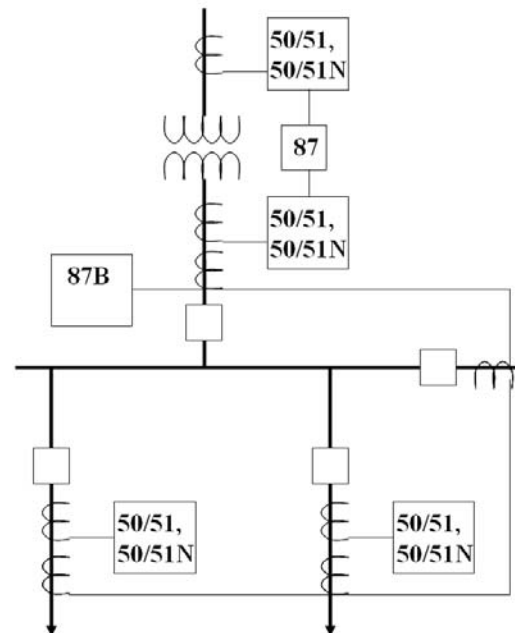


图 1. 母线差动保护原理

低阻抗母差保护方案不需要专用的电流互感器,但是装置的设置比高阻抗母差方案复杂很多。这两者保护方案都不能提供保护防止出线电缆室的故障。还要考虑外部出线故障时电流互感器饱和的可能会导致误动作[13]。

4.4.2 区域选择互锁。通过区域选择互锁能达到清除时间是3-10个周波。此方法需要主回路断路器保护和出线保护之间的通讯。如果下级保护启动,发闭锁信号给上一级断路器的保护。如果下级保护未发现故障,主回路断路器保护未接收到闭锁信号,主回路断路器能瞬时动作。

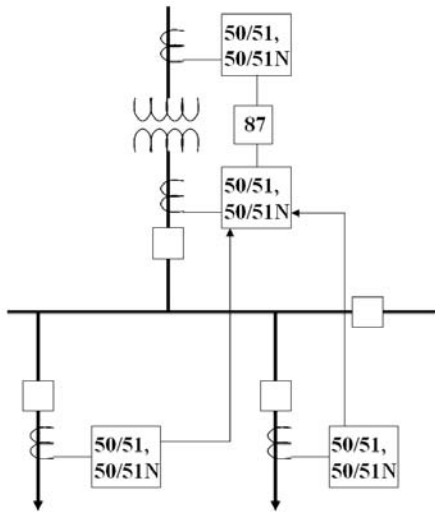


图2. 区域选择互锁原理

4.4.3 维护期间的瞬时跳闸。通过在维护开关期间投入瞬时跳闸能增加人员的安全。有产品可同时用于MV和LV系统，并且此方案能提高现有的数字式保护来执行，保护具有多套定值或多个瞬时过流段。从财产保护的观点看，这个方法在维护期间是划算的。

4.4.4 光纤传感器基于弧光保护。一个弧光故障能产生瞬时的辐射，可通过分析可见光来检测。基于弧光保护的光纤传感器使非常短的故障清除时间成为可能。为了避免误动，过流条件通常联合弧光检测(双感应)。因为大多数弧光故障开始为单相故障，测量零序电流是基本的，因为可在早期清除故障。

弧光保护的動作是基于同时发生的弧光和相过流或接地过流条件。在某些特殊目的，也可使用“只有弧光”条件。[14]

断路器的跳闸通过专门的弧光保护或装备了弧光保护选项的常规数字保护来启动。跳闸在7ms内启动(专门的弧光保护装置)或15ms内启动(数字保护装置带弧光选项)。如果半导体输出继电器替代传统的跳闸继电器，甚至能达到更短的跳闸启动。

图3显示了暴露在50kA故障电流500ms燃弧时间开关柜的测试结果。图4显示了同样50kA故障条件下，带基于弧光和电流的弧光保护系统总燃弧时间小于四个周波的结果。照片生动地展示了减少燃弧时间的重要性，按理减轻设备的损害。



图3. 测试结果用500ms燃弧时间



图4. 测量结果用基于弧光和电流的保护

事故能量比较检验了保护速度的重要性。图5展示了通过比较不同的保护方法对事故能量燃弧时间的效果。事故能量水平根据标准IEEE Std 1584™-2002 [15]计算。

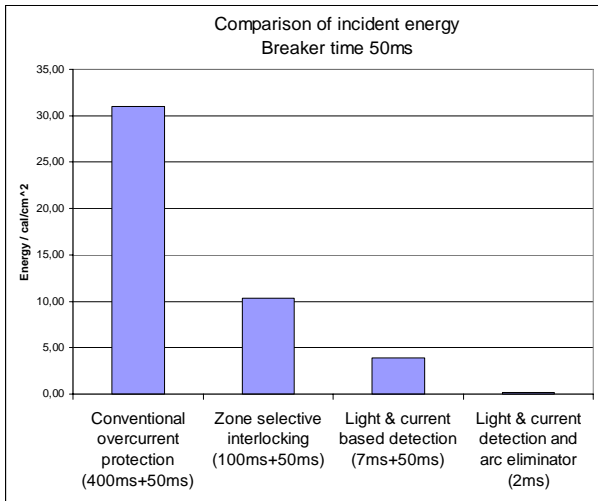


图5. 不同保护方法事故能量比较

5 基于弧光保护的光纤传感器的执行

5.1 专门的弧光保护装置

弧光保护通常有连接到专门弧光保护装置的独立使用的弧光传感器来执行。过流、接地故障等保护通过其它装置完成。全面的、有选择性的弧光保护系统包括了弧光传感器、从传感器收集数据的辅助单元和一个主单元或多个主单元，用于收集所有传感器数据，测量电流和跳开断路器，如果同时检测到弧光和过流。

弧光传感器 (图 6) 能是点传感器或光纤传感器。传感器类型的选择依赖于应用。根据实际经验，光纤环传感器对低压开关柜和有多个电机控制小室的盘柜是划算的。点传感器的优点是对新的和改造安装容易，并且提供精确的故障定位，因为传感器安装在每一个需要保护的间隔。维护人员的安全可通过另外的个人传感器来加强。不管传感器的类型，弧光保护系统的传感器和电缆的自检是必须具备的基本条件。



图 6. 点传感器和光纤传感器

在多区域的配置中，主单元必须能相互交换数据。激活传感器中的信息能传输到所有主单元，在相应区域的检测到过流的主单元跳开断路器。类似的，当地检测到的过流能传输到其它单元做外跳闸条件，如果一个单元检测到弧光但是没有过流。图7演示了有选择性的多区域保护的例子。

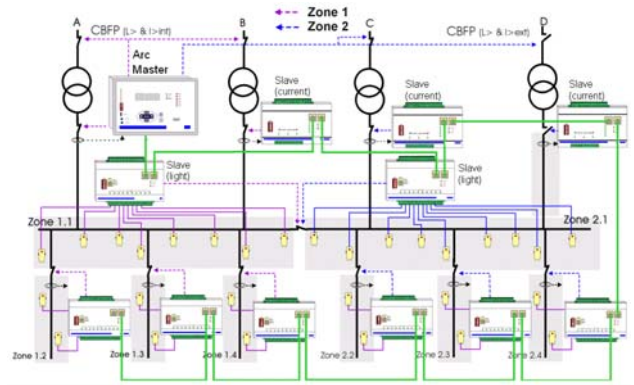


图 7. 专门弧光保护系统的有选择性弧光保护举例

划算的弧光保护是需要，如在风力发电和次级变电站。在这种环境中，使用无主单元的独立单元。图 8 和 9 演示了风力发电中菊芋弧光保护的点传感器举例。在图 10 中，举例说明如何安装光纤环传感器来提供更复杂的保护。

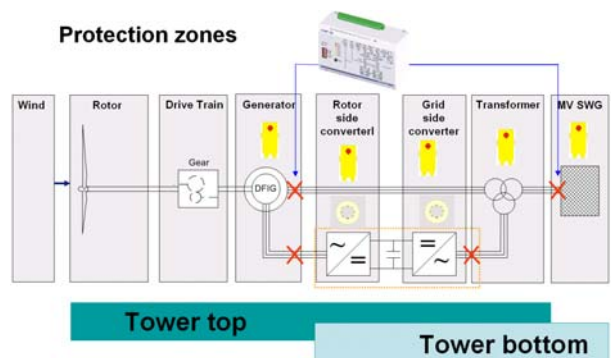


图 8. 用点传感器的风力发电保护区域

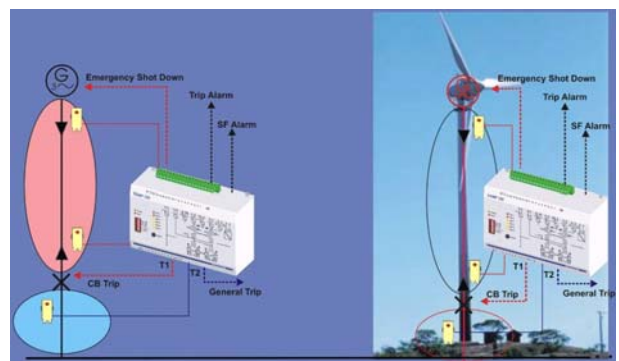


图 9. 风力发电中塔架电缆和 MV 开关柜的弧光保护，用点传感器

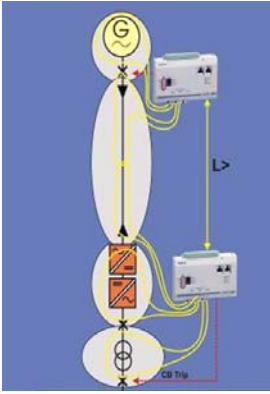


图 10. 风力发电中基于弧光保护的光纤环传感器

5.2 带弧光保护选项的数字式保护装置

用带弧光保护选项的数字式保护装置来实现弧光保护是非常划算的方法。在实际中，这意味着弧光传感器的输入能直接连接到装置。这种保护概念的总成本是最小的。弧光传感器输入可能包括两个弧光传感器输入、一个开关量输入和一个输出用于接收/发送弧光传感器数据到其它装置。装置包括了带弧光传感器的快速过流和接地故障保护段。

弧光保护的选择性可通过连接弧光传感器的出线过流保护来增加。如果弧光故障发生在出线区域，只有出线断路器跳开，变电站剩余其它部分工作。这是非常有益的，因为许多弧光故障发生在电缆小室。图11 演示了带弧光保护选项的常规数字式保护的弧光保护完成举例。

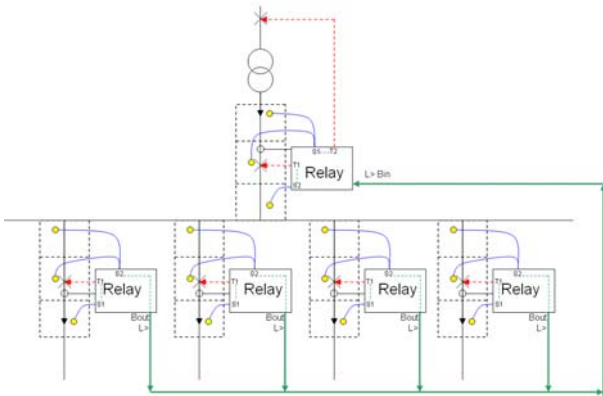


图 11. 带弧光保护选项的常规数字保护的选择性保护举例

5.3 快速的弧光保护

用弧光和过流的弧光保护系统其燃弧时间包括保护装置的動作时间(7-15ms) 和断路器的動作时间(典型50-80ms)。在某些情况下，甚至需要更短的燃弧时间，长用来限制压力的上升。为了这些目的，使用灭弧装置。当通过弧光保护装置检测到弧光时，弧光保护在2-5ms内跳开灭弧装置并且在7ms内发出跳

闸信号给断路器。灭弧装置以非常快的速度短路，并且熄灭弧光。弧光短路电流流进灭弧装置直到断路器跳开。

带限流熔丝的灭弧装置的联合是潜在的解决方案来克服限流熔丝的限制，并且此联合也可减少设备的压力，提高减少故障清除时间。

对低压系统灭弧装置能在2ms内灭弧。对中压系统灭弧装置能在5ms内灭弧。

6 用于方法比较的标准

当选择弧光保护方法时，速度和实际能量的减少是最重要的，但是不是唯一的标准。因为保护可能失败所带来的后果，必须强调保护方法的可靠性。这证实了系统自检的必要和在低故障电流下的动作能力。尤其在有大的停电成本的工业，选择性是非常关键的一条。在许多情况下，弧光保护安装在现有的开关柜中，其中需要改进的选项。经济理由至少包括最坏故障场合下的粗略评估。

7 结论

本论文描述了减少弧光危害的方法。由于燃弧时间是最重要的判定因素，快速基于弧光传感器的保护方法是最优先的。其它重要的观点是保护系统的选择性和自检。财产保护同安全问题一样，应该在任何系统设计时考虑。弧光感应和过流的联合提供了一个非常有效的方法。此方法能通过专门的弧光保护系统或使用带弧光保护选项的常规数字保护装置来使用。对大多数苛求的情况，快速灭弧技术是有用的。

参考

[1] Dugan, T., "Reducing the arc flash hazard", IEEE Industry Applications Magazine, p. 51-58, May/June 2007.

[2] Lee, R.H., "Pressures developed by arcs", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-23, p. 760-763, July 1987.

[3] Murphy, M. "How to form a bounding arc flash study for your site", IEEE IAS Electrical Safety Workshop, Dallas, Texas, March 18-21, 2008.

[4] Doan, D.M., "Designing a site electrical system with arc flash energy under 20 cal/cm²",

IEEE IAS Electrical Safety Workshop, Dallas, Texas, March 18-21, 2008.

[5] Phillips, J., Frain, M., "Fear of flashover", Power Engineer, June/July 2007.

[6] Bretchen, D., "Preventive arc fault protection", Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, GA, USA, 28th Oct-2nd Nov 2001, p. 311-316, IEEE 2001.

[7] Lee, W.-J., "Early stage arcing fault detection for medium/low voltage switchgear", 2007 IAS Electrical Safety Workshop, 27th Feb-2nd March 2007, Calgary, Canada.

[8] Sen, P.K., Nelson, J.P., "System grounding, ground fault protection and electrical safety: a new book on electrical safety", IEEE IAS/PCIC 14th Annual Electrical Safety Workshop, Calgary, Canada, February 27-March 2, 2007.

[9] Kay, J.A., Sullivan, P.B., Wactor, M., "Installation and application considerations of arc resistant medium voltage control equipment", IEEE PCIC Technical Conference, 17-19 September, 2007

[10] Swencki, S.J, Smith, J.E., Roybal, D.D., Burns, D.B., Wetzel, G.E., Mohla, D.C., "Electrical safety, arc flash hazards, and "the standards" a comprehensive overview", IEEE PCIC, September 12-14, 2005.

[11] Jones, R.A., Liggett, D.P., Capelli-Schellpfeffer, M., Macalady, T., Saunders, L.F., Downey, R.E., McClung, B., Smith, A., Jamil, S., Saporita, V., "Staged tests increase awareness of arc-flash hazards in electrical equipment", IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 36, No 2, March/April 2000.

[12] Wilson, R.A., Harju, R., Keisala, J., Ganesan, S., "Tripping with the speed of light: Arc flash protection", 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 27-29 March 2007, College Station, Texas.

[13] Buff, J., Zimmerman, K., "Application of existing technologies to reduce arc-flash hazards", 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 27-29 March, 2007, College Station, Texas.

[14] Arvola, J., Vähämäki, O., "Integrated arc protection concept", Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 19-21, 2004.

[15] IEEE Std 1584TM-2002, "IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations", IEEE, 2002.