

# 断口闪络保护的设计与工程应用

姚仲焕<sup>1</sup>, 陈水耀<sup>1</sup>, 屠黎明<sup>2</sup>

(1. 浙江省电力调度中心, 浙江 杭州 310007; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 通过对大型发电机-变压器组在进行同步并列或退出运行过程中发生断路器断口闪络的机理进行分析, 阐述了装设断口闪络保护的必要性, 并对双母线和 3/2 断路器接线的断口闪络保护逻辑进行了详细描述, 提出了闪络保护的合理设计方案。针对长期以来断口闪络保护存在的多种不同观点进行了分析, 提出了断口闪络保护作用于灭磁的同时不必切换厂用电, 得出采用隔离刀闸辅助触点作为断口闪络保护辅助判据方案不可取。此外, 针对断口闪络保护在工程应用中与失灵保护的接口问题提出了详细的实施方案, 给出了断口闪络保护的整定计算原则。

**关键词:** 断口闪络; 失灵保护; 工程应用

## Design and application of breaker flashover protection

YAO Zhong-huan<sup>1</sup>, CHEN Shui-yao<sup>1</sup>, TU Li-ming<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Power Dispatch Center, Hangzhou 310007, China;

2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The mechanism of flashover occurred in the process of the large generator-transformer synchronization or system disconnection is analyzed, and it is necessary to configure the flashover protection in the large generator-transformer protection. Logics for flashover protection applied to duplicate and 3/2-busbar are provided, and the design schemes for flashover protection are discussed. Some different opinions for flashover protection are discussed. When flashover protection acts, it will trip the magnetic blow-out switch, it is not necessary to power-supply transfer at the same time. The scheme that the auxiliary contact of the switch is taken as the auxiliary criterion composed of the flashover protection is not correct. In addition, the detailed scheme for practice is offered for interface between flashover protection and the circuit breaker failure protection. The setting calculating principle for flashover protection is provided.

**Key words:** flashover; circuit breaker failure protection; application for engineering

中图分类号: TM77 文献标识码: B 文章编号: 1003-4897(2008)07-0099-05

## 0 引言

大型发电机-变压器组在进行同步并列的过程中或发电机刚退出运行时, 随着发电机与系统等效电势之间的角度差  $\delta$  的不断变化, 作用在主变高压侧断路器断口上的电压也不断变化, 当  $\delta=180^\circ$  时, 其值为系统等效电势和发电机电势之和, 可能会造成断口闪络事故。断口闪络产生的冲击转矩不仅会造成断路器本身的损坏, 若不及时切除故障, 还可能引起事故扩大甚至破坏系统的稳定运行; 此外断口闪络时产生的负序电流超过发电机承受负序电流的能力时, 由此引起的附加损耗将严重威胁发电机的安全, 因此大型发电机应采取有效措施防止断口闪络事故。GIS 开关由于占地面积小, 维护周期长,

逐渐受到人们的青睐。但 GIS 开关是将断路器、隔离开关、互感器和母线等电气元件封闭组合在接地的金属外壳内的一种封闭组合电器, 当断路器发生闪络时, 不仅会损坏本断路器, 而且可能殃及周围的互感器和隔离开关等设备。综上所述, 大型发电机-变压器组装设断口闪络保护的必要性就显得越来越突出<sup>[1]</sup>。

## 1 断口闪络成因及装设断口闪络保护的必要性

断口闪络是指在断路器灭弧室的灭弧介质中发生的破坏性放电。断口闪络可能发生在如下两种情况下: 一是断路器内绝缘对地闪络放电故障, 主要是由于内部带电体对壳体放电, 其主要原因是工厂

内部装配和现场安装过程中清洁度的控制较差,异物在电场的作用下会从弱电场区移动到强电场区,从而引起内部放电;二是大型发电机-变压器组在同步并列的过程中或者发电机刚退出运行时,断路器断口两侧电势大于断口介质击穿电压时介质被击穿而发生闪络事故。上述两种情况下的闪络故障很相似,故障均发生在断路器内部。从近年来高压断路器运行分析来看,第一种闪络故障占多数,其发生的几率远高于第二种闪络故障。但由于第二种闪络通常发生在发电厂,在以往曾多次出现因断口闪络导致发变组高压侧断路器非全相运行,从而造成变压器损坏和发电机烧毁的事故<sup>[2]</sup>。

对于双母线接线的发变组或 3/2 断路器接线的边断路器,当断路器两侧均配置有 CT 时,发变组差动保护和母差保护均会动作切除对地闪络故障;当断路器只在远离母线侧装有 CT 时,母差保护会动作,发变组差动保护不会动作,此时只能靠发变组的后备保护动作切除对地闪络故障;对于 3/2 断路器接线的中间断路器,当断路器两侧均有 CT 时,同串中相邻两个元件的主保护均会迅速动作切除对地闪络故障,当断路器只有一侧装设 CT 时,则只有一个间隔的差动保护会动作,而对于同串的相邻间隔则属于区外故障,主保护不会动作,此时也只能靠后备保护经较长时间切除故障。

断路器发生对地闪络事故时,母差保护或发变组差动保护都能正确动作反映,但当发生断路器断口两侧介质击穿的闪络事故时,这些主保护均不会动作,因此有必要考虑装设专用的闪络保护用以检测此事故并动作于灭磁消除事故。这种闪络是通常所说的闪络故障,本文主要对此种闪络故障的闪络保护的实现方案及相关问题进行分析。

## 2 断口闪络保护的实现方案

由于断口闪络保护主要反应断口间介质被击穿的闪络事故,通常考虑采用负序电流方案。由于双母线接线和 3/2 断路器接线时发生闪络的断路器不同,下面将分别讨论双母线接线和 3/2 断路器接线时断口闪络保护的实现方案。

### 2.1 双母线接线断口闪络保护实现方案

断口闪络的基本特征是断路器处于断开状态而又有电流流入发电机。双母线接线的断路器断口闪络保护的逻辑图和回路图如图 1 和图 2 所示。

为了防止断路器辅助触点误开入导致闪络保护不正确动作,需同时引入断路器常开辅助触点和常闭辅助触点,二者互相校验以提高保护的可靠性。常开辅助触点取“反逻辑”,当断路器闭合后闭锁闪络保护。对于分相操作的断路器,应采用三相常闭辅助触点串联、三相常开辅助触点并联输入方式。

闪络保护经  $T_{DK1}$  时限作用于灭磁,并解除失灵保护电压闭锁,当灭磁无效时经  $T_{DK2}$  时限作用于起动失灵保护。为了防止单一继电器触点粘连误起动失灵保护,应在起动失灵的回路中串入  $T_{DK1}$  时限触点。

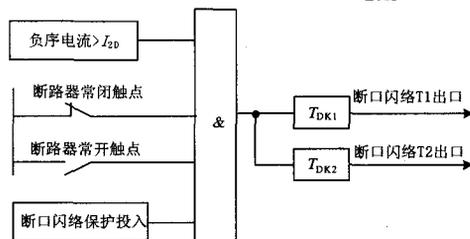


图 1 双母线接线断口闪络保护逻辑图

Fig.1 Logic diagram for flashover protection applied to duplicate-busbar

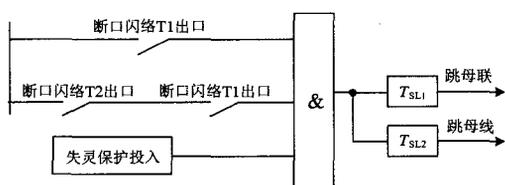


图 2 双母线接线断口闪络保护回路图  
(由失灵保护完成)

Fig.2 Circuit diagram for flashover protection applied to duplicate-busbar (finished by breaker failure protection)

当断路器发生闪络后,因为机组的灭磁时间常数较大,为了防止闪络保护误起动失灵,闪络保护  $T_{DK2}$  时限的保护动作和返回时间必须满足《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》(试行)的要求,其负序电流判别元件的动作和返回时间均不宜大于 20 ms,其返回系数也不宜低于 0.9。

闪络故障属于纵向故障,其与非全相保护的唯一区别是非全相时断路器处在三相位置不对应状态,而闪络故障时断路器在分相位置。当非全相或闪络时,失灵保护复压闭锁元件均存在灵敏度不足的问题,因此,闪络保护起动失灵时也应解除失灵保护电压闭锁。

为了在机组正常运行时自动退出闪络保护,可采用三相都有流即退出闪络保护的辅助措施。

### 2.2 3/2 断路器接线断口闪络保护的实现方案

对于 3/2 断路器的发变组单元接线,只有发变组间隔的边断路器和中断断路器均处于断开位置时才可能发生闪络事故。只要有一个断路器在合闸位置,即表明机组已经并网运行,发电机已与系统处于同步运行状态,处在分位的断路器断口两侧电压完全相同不可能发生闪络事故。3/2 断路器接线的断口闪络保护的逻辑图和回路图如图 3 和图 4 所示。

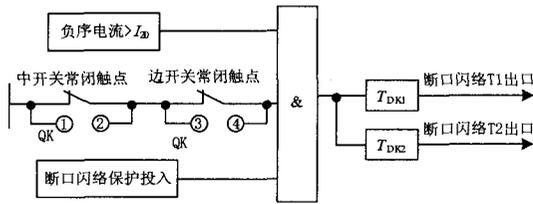


图3 3/2断路器接线的断口闪络保护逻辑图

Fig.3 Logic diagram for flashover protection applied to 3/2-busbar

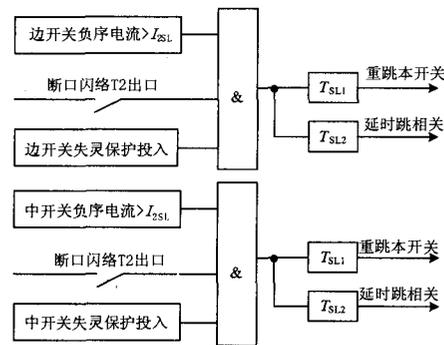
图4 3/2断路器接线的断口闪络保护回路图  
(由失灵保护完成)

Fig.4 Circuit diagram for flashover protection applied to 3/2 busbar( finished by breaker failure protection )

断路器位置触点应为边断路器和中断路器常闭辅助触点按“相串联”接点，不采用边断路器和中断路器常闭辅助触点分别输入保护装置，由装置内部实现“与”逻辑的方案。3/2断路器接线发生断口闪络事故，闪络保护作用于灭磁无效后，即使同时起动两台断路器的失灵保护，因未发生闪络的断路器处于断开位置，保护感受不到故障电流，失灵保护不会误动作。

当边断路器或中断路器之一检修，在该断路器二次回路工作或进行跳合闸试验时，断路器辅助触点不能真实地反映断路器位置，若机组通过另一个断路器并网的过程中发生闪络事故时，可能导致断口闪络保护拒动，因此在断路器辅助触点上应分别并联断路器检修转换开关 QK1~2 触点和 QK3~4 触点（QK1~2 在边断路器检修时导通，QK3~4 在中断路器检修时导通，正常运行时 QK1~2 和 QK3~4 触点均不导通），当某断路器检修时应将转换开关置于对应的检修位置，而不分别设边断路器和中断路器检修转换开关，这样可以保证断路器合上后立即退出闪络保护。若边断路器和中断路器分别设置检修转换开关，当某台断路器检修时只能将其转换开关置于检修位置，而待并断路器的检修转换开关则不能置于检修位置；若误将待并断路器的

检修转换开关置于检修位置时，断路器合上后不能立即退出闪络保护，边断路器和中断路器共同采用一个检修转换开关则不存在此问题。

为了防止正常运行时，一个断路器出现非全相或者当边断路器和中断路器的负荷不平衡时出现负序电流导致闪络保护误动作，应将边断路器和中断路器电流分别引入保护装置，在装置内部采用“和”电流方式判负序电流或者直接取主变高压侧套管电流判负序电流。

### 3 断口闪络保护的几个特殊问题

#### 3.1 闪络保护动作灭磁的同时起动厂用电切换问题

有一种观点认为当断路器发生闪络时，可能威胁到厂用系统的安全，因此要求闪络保护跳灭磁开关的同时起动厂用电快切，这种担心完全是多余的，理由如下：

1) 当发电机出口无断路器时，机组在待并状态时是通过起备变带厂用系统的，此时起动厂用电快切无意义；

2) 当发电机出口有断路器时，发电机在待并状态时是通过主变倒送电带厂用系统的，而发电机出口电压较低，因此不考虑主变高压侧断路器和发电机出口断路器的闪络问题；

3) 正常停机时，在机组解列前已经将机组有功和无功功率调得尽可能低，并将厂用系统倒至起备变上，此时起动快切毫无意义；

4) 当发生故障时，主变高压侧断路器跳开后发生闪络时，闪络保护动作跳灭磁开关的同时起动厂用电切换也无太多意义，理由如下：

a. 只有动作于解列的保护跳开主变高压侧开关后发生的闪络才考虑切厂用电的问题；

b. 当故障发生在发变组保护范围内部时，发变组保护动作后一般均动作于全停，此时闪络保护不应起动厂用电切换；

c. 当故障发生在系统侧时，仅考虑发变组后备保护动作，但是现在的机组后备保护一般仅作为母线的后备保护，母线故障一般为永久性故障，并且母差保护动作后均联锁停机，发变组后备保护动作几率很低，因此可以不考虑此种情况下闪络保护动作后切换厂用电问题；

d. 发变组异常运行的保护动作于解列时发生的闪络故障，闪络保护动作时应该起动厂用电切换。

综上所述，仅异常运行的保护作用于解列时发生的闪络事故，闪络保护起动厂用电切换才有意义；但是异常运行的保护动作于解列，占断路器并网和解列操作的比例很小，因此，闪络保护动作于灭磁

的同时起动厂用电切换无多大意义。

### 3.2 引入隔离刀闸辅助触点作为断口闪络保护的辅助判据问题

有种观点认为可以借鉴短引线保护的成功经验,将断路器隔离刀闸的辅助触点作为断口闪络保护的辅助判据,从理论上讲是可行的,但是实际情况却并非如此。通过长电缆(或气体绝缘电缆)与GIS相连的变压器,为避免因特高频操作过电压(VFTO)造成变压器高压绕组首端匝间绝缘损坏事故,运行中应采用“带电冷备用”的运行方式(即断路器分闸后,其母线侧隔离开关保持合闸状态运行),以减少投切空载母线产生VFTO的概率。因此,断路器隔离刀闸位置不能真实地反映断路器位置;另外,绝大多数的隔离刀闸操作回路均采用交流电源,而交流串进直流回路是导致保护误动作的一大干扰源,保护应尽量避免引入来自交流操作回路的开关量作为辅助判据。从以上两点可以看出,采用隔离刀闸辅助触点作为断口闪络保护的辅助判据并不可取。

### 3.3 断口闪络保护与失灵保护的接口问题

有的厂家为了简化断口闪络保护的配置,对于3/2断路器接线的断口闪络保护用独立的断口闪络保护装置完成闪络保护跳灭磁开关和灭磁无效时经延时跳相关断路器的功能,即由一个装置同时完成了闪络保护和闪络故障时断路器失灵保护的功能,可靠性较差容易误动作。

根据全国继电保护事故统计资料,历年来失灵保护的准确动作率一直都很低,而拒动的报道却很少。由于断路器失灵保护误动作的后果很严重,失灵保护的回路设计应侧重于防止失灵误动作而不是防止失灵保护拒动作,回路中任一环节的误动作均不应导致失灵最终出口的误动作<sup>[3]</sup>,因此闪络保护动作于灭磁无效后,应该由独立的失灵保护装置完成跳相关断路器的功能,而不能由闪络保护自身完成此功能。

为了提高失灵保护的可靠性,往往需要引入断路器常开辅助触点作为辅助判据,发生闪络事故时断路器必然处于跳闸位置,若闪络保护与其余电气量保护共用起动失灵回路,则失灵保护将拒动作。双母线接线的发电厂,需要在断路器辅助保护装置中设置独立的闪络保护起动失灵出口。当为3/2断路器接线时,断路器保护应增加断口闪络保护起动失灵开入回路,此开入不判断断路器位置。

### 3.4 断口闪络保护的定值整定

#### 1) 负序电流整定原则

断口闪络保护负序电流 $I_{2D}$ 的整定,可按发电机允许持续的负序电流下能可靠返回的条件整定,即

$I_{2D} = \frac{K_{rel} I_{2\infty}}{K_r}$ 。其中, $K_{rel}$ 为可靠系数取1.3~1.5, $K_r$ 为返回系数取0.85~0.95, $I_{2\infty}$ 为发电机允许持续负序电流(折算到主变高压侧)。

#### 2) 断口闪络延时整定原则

断口闪络延时 $T_{DK1}$ 一般按躲过断路器操作时三相不同期时间整定,通常为100~200ms;而 $T_{DK2}$ 却很难整定,因为机组灭磁时间常数通常在1s以上,为了防止误起动失灵, $T_{DK2}$ 理论上应大于机组灭磁时间常数即在1s以上,但是当发生闪络事故时,负序电流为1/3倍相电流远远超出发电机(5%~10%) $I_E$ 负序电流的承受能力,对发电机的危害很大,切除时间过长可能会损坏发电机,也会加剧对断路器本身的损害。正是因为 $T_{DK2}$ 很难整定,实际运行的机组即使配置了断口闪络保护,但几乎都不起动失灵保护。

发电机在灭磁的过程中随着励磁电流的衰减,发电机机端电势也随之降低,最后降低到剩磁电压,当励磁电流 $I_{fd}$ 降低到灭磁开始瞬间励磁电流 $I_{f0}$ 的1/100即可认为灭磁已经结束<sup>[4]</sup>。当断路器发生闪络时,灭弧室已经不具备灭弧能力,当机端电压降低到一定程度时才能自然停止闪络,因此 $T_{DK2}$ 的整定原则应保证闪络时产生的负序电流不会造成发电机的损害为基本原则。

#### 3) 典型整定算例

下面以一台800MW机组(相关参数详见表1)主变高压侧断路器发生闪络时,发电机能承受的负序电流的时间为例,来验证 $T_{DK2}$ 按发电机能承受的负序电流能力整定的合理性。

表1 某电厂800MW机组及系统相关参数

Tab. 1 Parameters for 800 MW generator and the connected system in a power plant

对象	相关参数
系统侧	$X_{s1}=0.008$ , $X_{s0}=0.024$ (基准容量 $S_B=100\text{MVA}$ , 基准电压取平均电压 $U_B=U_{av}$ )
发电机	$S_G=888.9\text{MVA}$ , $U_G=24\text{kV}$ , $I_G=21.4\text{kA}$ , $X_d^*=0.216$ , $X_2=0.227$ , $A=8$ , $I_{2\infty}=0.08$ , $X_{G1}=X_d^* \cdot S_B/S_G=0.0243$
主变	$S_T=1000\text{MVA}$ , $U_K\%=15.1\%$ , $X_{T1}=U_K\%/100 \cdot S_B/S_T=0.0151$

注: $I_{2\infty}$ 为发电机允许持续负序电流标么值; $A$ 为发电机转子表层承受负序电流的常数。

根据表1相关参数,可得正序阻抗

$$Z_1 = X_{G1} + X_{T1} + X_{s1} = 0.0474, \text{ 负序阻抗}$$

$$Z_2 = Z_1 = 0.0474, \text{ 零序阻抗 } Z_0 = 0.024。$$

当主变高压侧断路器在断口两端电势角度差  $\delta = 180^\circ$  发生闪络事故时, 其对应的负序电流  $I_{2*} = (2E_0 \sin(\delta/2))/(Z_1 + Z_2 + Z_0) = 16.84$ , 由于机端基准电流  $I_B = S_B / (\sqrt{3}U_G) = 2406$  A, 可得机端负序电流  $I_2 = I_{2*} \cdot I_G = 40517$  A 和  $I_{2*} = I_2 / I_G = 1.9$ 。根据发电机负序过负荷特性<sup>[5]</sup>, 得: 在发生闪络故障且不考虑灭磁衰减影响时, 负序电流最大允许时间为  $t = \frac{A}{I_{2*}^2 - I_{2*装}^2} = \frac{8}{1.9^2 - 0.08^2} = 2.2$  s, 即当发生断口闪络事故时, 发电机能承受此负序电流的时间为 2.2 s, 远大于断路器失灵保护的動作时间(通常为 0.5 s)。因此,  $T_{DK2}$  可按照发生闪络事故时发电机能承受负序电流的时间整定。

#### 4 结语

随着机组容量的不断增大和断路器无油化进程的加快, GIS 开关的大量使用, 闪络事故时有发生, 大型发电机-变压器组装设闪络保护必要性日渐凸现。

1) 文中提出了双母线接线和 3/2 断路器接线时断口闪络保护的逻辑和工程应用方案。

2) 针对长期以来断口闪络动作后是否切换厂用电、是否采用隔离刀闸辅助触点作为断口闪络保护辅助判据的不同观点进行了分析, 得出了闪络保护作用于灭磁的同时可不起动厂用电切换、不应采用隔离刀闸辅助触点作为断口闪络保护辅助判据的结论。

3) 闪络保护起动失灵和常规电气量起动失灵有所区别, 无论是双母线接线的失灵起动回路还是 3/2 断路器接线的断路器保护都需要进行相应的更改; 对于双母线接线的断口闪络保护宜由断路器辅助保护完成, 断口闪络保护起动失灵时电流判别应与其余电气量保护起动失灵区别对待, 否则会增加失灵电流判别定值整定的复杂性, 对于 3/2 断路器接线的断口闪络保护不能由并网断路器保护实现, 应由发变组保护完成。

(上接第 98 页 continued from page 98)

2) 要求 ABB 厂家更改失灵逻辑, 取消失灵启动开入带保持功能, 采用不带保持的失灵启动判据, 提高开入光耦的動作功率和设置开入延时動作门槛。要求失灵起动电流和失灵开入触点一直動作到整定的时延两个条件同时满足才能开放失灵出口, 且要求失灵电流和失灵起動量任一条件返回就要瞬时返回失灵。

4) 提出了断口闪络保护的整定计算原则, 以某电厂 800 MW 机组为例进行了断口闪络保护相关计算, 验证了断口闪络保护  $T_{DK2}$  时限按发电机能承受负序电流的能力整定的合理性。

#### 参考文献

- [1] 中国国家标准化管理委员会. 继电保护和安全自动装置技术规程[S]. 2006.  
China State Standard Management Committee, Technical Code for Relaying Protection and Security Automatic Equipment[S]. 2006.
- [2] 宋杲, 崔景春, 袁大陆. 1999~2003 年高压断路器运行分析[J]. 电力设备, 2005, 6(2): 6-13.  
SONG Hao, CUI Jing-chun, YUAN Da-lu. Operating Analysis of High Voltage Circuit Breaker in 1999-2003[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(2): 6-13.
- [3] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社 1999.  
WANG Mei-yi. Application of Power System Relay Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [4] 张德平. 关于线性电阻灭磁系统的灭磁时间问题[J]. 水利发电, 1994, (10): 32-33.  
ZHANG De-ping. Study on Demagnetization Time in Demagnetization System Adopting Linear Resistance[J]. Water Power, 1994, (10): 32-33.
- [5] 王维俭. 电气主设备继电保护原理和应用(第 2 版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
WANG Wei-jian. Principle and Application of Electric Power Equipment Protection (Second Edition)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

收稿日期: 2007-10-29; 修回日期: 2008-03-06

作者简介:

姚仲焕(1962-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事继电保护及安全自动装置的技术管理工作; E-mail: yao\_zhonghuan@dc.zpepc.com.cn

陈水耀(1976-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事继电保护及安全自动装置的技术管理工作;

屠黎明(1972-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事元件保护的研究和开发工作。

3) 为防止其它装置或回路也存在类似问题, 将逐步对各站直流系统进行技改, 将不符合要求的老旧的直流设备更换成新的直流设备, 同时对直流系统进行反措改造, 让直流母线电压更加稳定。

收稿日期: 2007-08-06; 修回日期: 2007-11-08

作者简介:

黄金魁(1978-), 男, 工学双学士, 工程师, 主要从事电气工程设计、维护和管理。E-mail: jk-h@163.com