

[发电机]

1 000 MW发电机—变压器组 内部短路的主保护配置方案探讨

文/广东电网有限责任公司培训与评价中心（广东省电力工业职业技术学校） 李金英
黑龙江科技大学电气与控制工程学院 赵瑞婷

1 000 MW大型发电机—变压器组结构复杂，价格昂贵，一旦发生故障，检修期长，经济损失巨大。因此结合百万千瓦机组的结构特点，装设完善的继电保护装置有着重要的意义。文章主要针对1 000 MW机组结构特点，对其内部短路时的主保护配置方案进行分析探讨。

现在1 000 MW机组在我国已建和在建的工程项目越来越多，对于这种大容量机组的继电保护，不能盲目套用300 MW、600 MW 机组的设计，而要根据发电机和变压器结构的特点，配置合适的保护。在一些百万千瓦机组的工程设计和保护设备招标过程中，对于某些具体的保护是否应该配置，采用什么原理的保护性能较优，应注意哪些附加条件等问题一直有些不明确的地方。

发电机内部短路故障通常主要是指定子的各种相间和匝间短路故障，这两种短路故障类型使发电机被短接的绕组中产生巨大的短路电流，引起绕组及铁心的严重损伤，对发电机本体造成严重损毁。本文讨论的发电机定子内部短路主要指定子绕组的相间短路和匝间短路，兼顾定子绕组开焊故障，但不包括单相接地故障。发电机定子绕组相间及匝间短路的主保护主要有四种：完全纵差保护、不完全纵差保护、单元件横差保护（又称零序电流型横差保护）和裂相横差保护，简称为“两纵（两种纵差保护）两横（两种横差保护）”。

发电机差动保护

1. 完全纵差保护

完全纵差保护通过比较发电机机端与中性点

侧同相电流的大小和相位来检测保护区内相间短路故障。保护接线如图1所示。电流比相同的两个电流互感器，分别装设在发电机出口侧和中性点侧的同一相上，分别测量同相绕组机端与中性点端的相电流。在正常运行及外部故障时，由于机端与中性点端两侧同相的电流互感器的特性不可能完全一致，所以不平衡电流不会等于零。为保证纵差保护在发电机正常运行及外部故障时，不发生误动作，纵差保护动作值必须按大于发电机区外故障时的最大不平衡电流来整定，这样就使得保护在发电机内部故障时灵敏系数降低。为保证发电机内部故障时的灵敏系数，要求完全纵差保护最小差流的动作值仅为 $0.2 I_{aN}$ （ I_{aN} 为发电机的额定电流）。

由于机端短路时短路电流较大，一般都能满足完全纵差保护灵敏系数的要求。但当发电机内部经过过渡电阻短路时，短路电流小于机端短路电流，并且短路点越靠近发电机的中性点，短路电流越小。当中性点附近短路时，短路电流很小（甚至为零）且小于动作值时，保护不能动作，故发电机中性点附近存在保护的死区，完全纵差保护无法将故障发电机切除，这将对发电机造成很大的损害。为了使中性点附近的死区减少，希望尽可能减小发电机纵差保护的動作电流；为了使发电机外部故障时完全纵差保护可靠地不动作，

动作电流必须大于发电机外部故障时的最大不平衡电流。要达到这两方面的要求,需要采用一些改进措施。提高差动保护灵敏系数的措施主要包括两个方面内容:①尽量减少不平衡电流,这包括选用特性尽可能一致的TA,如选用同型号的差动保护专用TA;并尽量减少二次回路负荷等。②改善纵差保护的動作特性。目前在大机组完全纵差保护中广泛采用了具有折线比率制动特性的纵差保护,有效地改善了灵敏系数和制动特性。

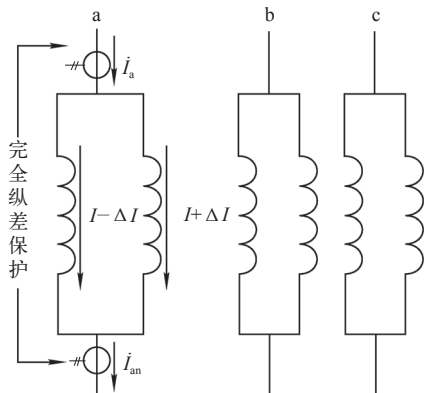


图1 完全纵差保护示意图

2. 裂相横差保护

大容量汽轮发电机额定电流大,故每相都是由两个绕组并联,以减少分支绕组中的电流,提高载流能力,减少损耗。三相的并联绕组通常接成双星形联结。这就为裂相横差保护的装设提供了条件。裂相横差保护接线如图2所示,该保护装于每相的两个并联绕组之间,测量两并联分支绕组间的差流。正常运行时两个并联绕组中产生的电动势相等,两个并联绕组分别流过负荷电流的二分之一,差流为零,裂相横差保护不动作。定子绕组的匝间短路指同相的并联绕组其中一支内部的匝与匝之间短路,或同相的两个并联绕组之间的短路两种情况。当定子绕组发生以上任一种匝间短路时,由于部分线匝的电动势被短接,致使两并联绕组剩余的有效线匝的电动势不相等,两个并联分支绕组分别流过不相等的电流,差流不为零,当差流大于整定值时,裂相横差保护动作。所以当定子绕组发生同相同分支内部的匝间短路、同相不同分支之间的匝间短路和不同相两分支之间的相间短路时,裂相横差保护均能动作。在大负荷时若其中一个分支绕组发生开焊故障,裂相横差保护也能反映。但要构成此种保护需要6只CT和3只继电器,元件较多,接线复杂,而且当短路匝数少时会有死区。

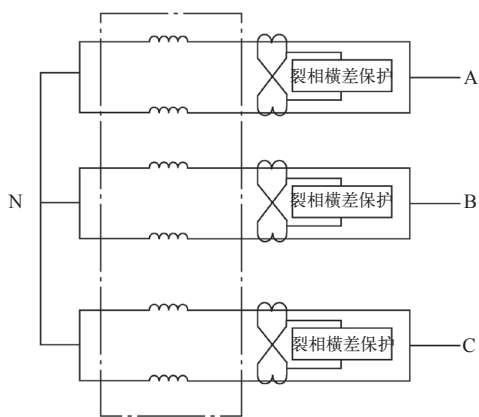


图2 裂相横差保护示意图

3. 单元件横差保护

此种保护接于图3中的CT₁,CT₁装于发电机分支绕组中性点(O₁与O₂点)之间的连线上,当发生绕组匝间短路、绕组相间短路和分支开焊等故障时在CT₁处均有环流流过。由于只采用一个电流互感器来构成横差保护,故这种保护又称为单元件式横差动保护。这种保护没有由电流互感器特性不同而引起的不平衡电流,因此,保护灵敏度较高,保护所需元件少,接线也较简单。为消除外部故障时发电机电动势的波形畸变给保护造成的影响,保护装置中应装设三次谐波滤波器,以消除三次谐波的影响,提高灵敏度。

4. 不完全差动保护

此种保护接于图3中的CT₂和CT₃,即差动保护的一侧接每相单分支的电流,另一侧接相电流,通过CT电流比或保护装置内的平衡系数调整电流平衡。当发生绕组匝间短路、绕组相间短路、分支开焊和引出线短路等故障时有差流流过,使保护动作。若不完全纵差保护两侧的CT₂和CT₃型号不同型。即使两侧CT在正常运行时二次电流的大小、相位相差不大,但在外部故障的暂态过程中,由于两侧CT不同型而导致其传变特性不一致,流入保护装置的两侧电流的相位也会相差很大,有可能导致保护装置误动作。

5. 百万千瓦级汽轮发电机差动保护的现状

发电机完全纵差保护对相间故障的灵敏度最高,但却无法反映定子绕组的匝间短路和开焊故障,而单元件横差保护、不完全差动保护和裂相横差动保护则可以弥补其不足,对相间短路也能很好地反映。它们组合在一起,可以对发电机构成非常完善的主保护双重化方案。但据了解,国内在建和已运行的百万千瓦级汽轮发电机组,还有

一些日本的大型电厂,其发电机中性点和出线侧均只能引出3个端头,国内三大电机厂与外方合作的产品均是如此,所以不可能安装横差保护、不完全差动保护和裂相横差保护,只能采用发电机完全纵差保护作为主保护,这也是百万千瓦级汽轮发电机组在结构和保护配置上存在的矛盾问题。

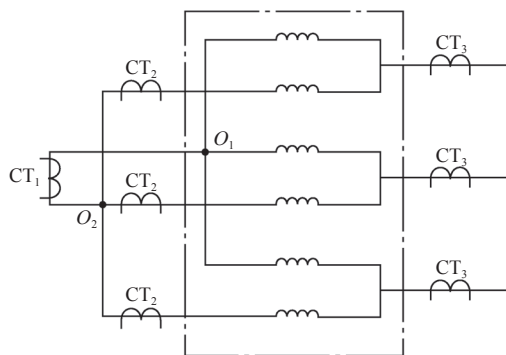


图3 单元件横差和不完全差动保护示意图

发电机匝间短路保护

1. 百万千瓦级汽轮发电机装设匝间短路保护的必要性

据调查,国内设计院的工程,如玉环电厂和邹县电厂,都未取消匝间短路保护;而国外设计的工程,如外高桥电厂、大亚湾核电站、岭澳核电站以及日本的碧南电厂和常陆那珂电厂,则未装此保护。日本的技术人员认为发电机不存在匝间短路问题,法国阿尔斯通的专家在设计核电站时也认为定子线圈的布置和工艺结构方面已避免了匝间短路的可能性。有一种观点认为,发电机定子槽内匝间绝缘强度比对地绝缘强度高,因此发生匝间短路前应先发生定子接地故障。认为发电机不会发生匝间短路,装设此保护意义不大。但在长期运行中,发电机端部定子线棒由于经受短路电流的冲击而变形,或由于绝缘的劣化从而直接引起匝间短路的实例屡见不鲜。近年来,已经发生数台600 MW发电机因该故障而烧毁的事例。一般情况下,定子槽内故障先由单相接地开始,继而发生匝间或相间短路。但并非所有的匝间短路均由单相接地故障造成,尤其是发生于绕组端部的匝间短路。即使装设100%动作区的定子单相接地保护,也并不能避免匝间短路的发生。对于1 000 MW的特大型汽轮发电机,如果完全寄希望于单相接地保护来避免危害严重的定子绕组匝间短路,有可能造成非常严重的后果。因此,对于1 000 MW级大型机组,很有必要装设匝间短路保护。

2. 百万千瓦级汽轮发电机匝间短路保护采用的原理

保护原理方面,如前所述,百万千瓦级汽轮发电机组,由于结构紧凑,各分支绕组无法全部引出,通常出线侧和中性点侧均只能引出3个端头,故而上述对匝间短路有很好技术性能的保护均无法装设,如单元件横差保护、不完全差动保护和裂相横差保护等。因此对于1 000 MW级大型机组通常也只能采用反映纵向零序电压原理的匝间短路保护。该保护虽然不正确动作率较高,但目前还没有其他可替代的成熟产品。反映纵向零序电压原理的匝间短路保护,其零序电压 $3\dot{U}_0$ 取自发电机机端电压互感器TV0接成开口三角接线的开口端绕组,如图4所示。为了反映三相对中性点的零序电压,此保护用电压互感器TV0一次侧的中性点不可接地,而必须与发电机的中性点相连。因此TV0的一次绕组必须是全绝缘的,而且它不能被用来测量相对地的电压。所以图4中的TV0是零序电压匝间短路保护专用的电压互感器。

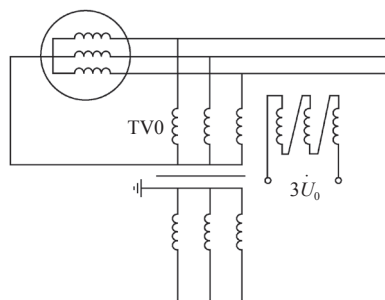


图4 零序电压匝间短路保护用TV0

由于发电机在制造上的原因,正常运行或外部故障时会出现3次谐波电动势,使电压互感器开口三角绕组上出现较大的零序电压。因此,在构成零序电压匝间短路保护时,为了提高灵敏度须设置3次谐波滤波器。但是当发电机外部短路电流较大时,由于电枢反应磁通的波形畸变变得非常厉害,出现的3次谐波,往往经过3次谐波滤波器后还有相当高的值。为了防止低定值零序电压匝间短路保护在外部短路时误动作,可设负序功率方向闭锁元件。通过判断负序功率方向,便可区分是发电机内部故障还是系统故障。在外部短路时,利用负序功率方向闭锁元件使保护退出工作,从而进一步提高灵敏度。为防止专用电压互感器因断线而在开口三角绕组侧出现很大的零序电压,使继电器误动作,还须装设断线闭锁元件。在断线时,使保护退出工作,并发出信号。

主变压器差动保护

1. 纵差保护

纵差保护是以变压器一次绕组和二次绕组的出线首端构成差动回路，保护范围包含了铁心磁路耦合的、在电路上不相连的原二次绕组，以及套管和引出线。对于变压器内部相间短路故障、匝间层间短路故障以及YN接法的高压侧单相接地短路，纵差保护均能起到保护作用。作为变压器的主保护，纵差保护已成功地应用了多年，目前还没有其他保护能完全取代其地位。但是变压器纵差保护一直存在励磁涌流、过励磁等引起保护误动的特殊问题，虽说已有很多防励磁涌流的闭锁方案，但不能完全防止误动的发生。

2. 分侧纵差保护

对于百万千瓦级发电机的主变压器，若选用单相变压器时，由于其每一个绕组均有两个引出端，这就为装设单独的分侧纵差保护创造了必要条件。分侧纵差保护是将一个双绕组变压器分解看作两个被保护对象（二次绕组和二次绕组），二次绕组和二次绕组分别单独装设一套纵差保护。由于每套分侧纵差保护的保护对象只是纯电路的绕组，而不是像传统的变压器纵差保护那样，保护范围包含了由铁心磁路耦合的、在电路上不相连的原二次绕组，这就使得分侧纵差保护与励磁涌流、过励磁电流完全没有关系，因为这些电流对分侧纵差保护而言只是穿越性电流而已，这就从根本上避免了励磁涌流、过励磁的影响。一台双绕组的变压器装设六套分侧纵差保护，比传统纵差保护增加了一倍，但对于相间短路和高压侧接地故障均有较高的灵敏性，保护效果很好。其缺点是对绕组匝间短路没有保护作用，只能单纯依靠瓦斯保护，或再加其他原理的保护以构成匝间短路主保护的双重化。由于发电厂中主变压器低压侧多为高阻接地系统，当低压绕组接地时，接地电流很小，分侧纵差很难对这种故障有所反映。

3. 零序差动保护

对于高压侧为YN接法的主变压器，主保护若采用传统的相间短路的纵差保护，当高压侧发生单相接地短路时，相间短路的差动保护反映接地短路时的灵敏度可能会较低。单相变压器比三相变压器发生相间短路的几率大大降低，接地短路的几率相对增加。随着单相变压器在发电厂变电站的广泛应用，有必要加强单相接地短路的保

护。零序差动保护已经成功地应用在自耦变压器上，在发电厂的单相主变压器上也成功使用。零序差动保护的接线如图5所示，对单相变压器，将主变压器星形侧绕组的首端与末端的三相电流互感器二次侧分别接成零序电流滤过器的方式，然后按环流法接入零序差动保护，如图5a所示。对三相变压器，则将主变压器星形侧绕组首端的三相电流互感器二次侧接成零序电流滤过器，再与主变压器中性点电流互感器二次按环流法接入零序差动保护，如图5b所示。

不论是三相变压器还是单相变压器，均须配置纵差保护作为主保护，而对于单相变压器，相间短路几乎不可能，配置零序差动保护和分侧纵差保护均是为了反映单相接地故障，性质相同，而零序差动保护所需元件较少，装置简单。对于三相变压器，不可能配置分侧纵差保护，当纵差保护对高压绕组单相接地灵敏度不够时可增配零序差动保护。

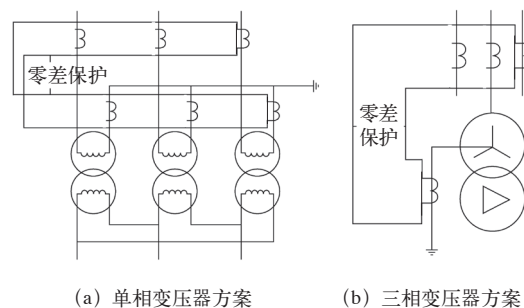


图5 主变压器零序差动保护示意图

结束语

鉴于1 000 MW级发电机结构上的特点，定子相间短路的主保护只能采用发电机完全纵差保护。鉴于1 000 MW级发电机依然存在发生匝间短路的可能性，建议安装匝间短路保护，采用反映纵向零序电压原理的匝间短路保护，并应采取提高灵敏度和防误动的措施。为了减少误动的可能，建议不配置大差动保护。对于1 000 MW级发电机的主变压器，不论是采用三相变压器还是单相变压器，均须配置纵差保护作为主保护。而对于单相变压器，为了灵敏地反映单相接地故障，可增设零序差动保护或者分侧纵差保护；对于三相变压器，当纵差保护对高压绕组单相接地灵敏度不够时可增配零序差动保护。EA

(收稿日期：2019.02.28)

(编辑：朱金凤)