

大型发电机组定子和转子的灵敏接地保护技术

Dr. Hans-Joachim Herrmann¹

高迪军²

(1 西门子股份公司输配电集团能源自动化部, 德国纽伦堡;

2 西门子电力自动化有限公司产品经理, 南京 211100)

【摘要】大型发电厂都设计成发电机-变压器单元组的接线方式, 发电机中性点不接地或者通过高阻接地。发电机发生单相对地故障-定子接地的可能性, 远远高于其它的故障类型。发电机保护装置的一个重要任务就是要探测这种类型的故障。本篇文章将关注发电机的定子接地故障保护, 重点介绍覆盖 100%定子绕组范围的注入式保护原理。

由于发电机的转子回路与地之间完全电气隔离, 因此转子回路发生一点接地故障只产生很小的接地电流, 不会损坏转子。如果接着在励磁回路的另外一点发生了接地故障, 那么故障电流就会流经受影响的转子绕组。大型发电机的励磁电流很大, 因此转子绕组的两点接地将会严重损坏转子和励磁机。如果转子的大部分绕组发生短路, 畸变的磁场产生很大的机械力矩, 造成一端受力强烈而另一端受力微小, 结果将导致在转子本体上产生严重的受力不均衡。如果是大型发电机, 机械力将达到 50-100 吨。这会导致转子产生强烈的振动从而损坏轴承, 甚至导致转子错位而损伤到定子绕组。因此, 发电机的转子接地保护应该设计得尽可能地灵敏。

【关键词】定子接地故障保护 100% 保护范围 外加 20Hz 低频交流电压注入方法 转子接地故障保护 灵敏度 微机保护

1. 定子接地故障保护

1.1 定子接地保护基础

图 1 标示的是发电机-变压器单元组接线的典型一次图, 其中包括发电机、升压变压器和厂用变压器。根据不同的电厂运行要求, 有时候在发电机的出口会设置断路器。可能会发生定子接地故障的区域包含在图 1 的圆圈范围内。经常发生的暂态过电压引起绝缘老化, 使得定子接地故障主要发生在发电机机端侧。某些机械问题也可能引起绝缘破坏, 从而发生接地故障。接地故障点可能位于定子绕组的任一位置, 有时候甚至会在发电机中性点附近发生接地故障。

为了最大程度地降低接地故障对定子铁心和绕组的损坏, 接地电流通常限制到 10 A 以下, 在最差的情况下可能达到 20 A (请见图 2)。接地电流的幅值主要取决于发电机定子绕组对地电容和负载电阻的大小。

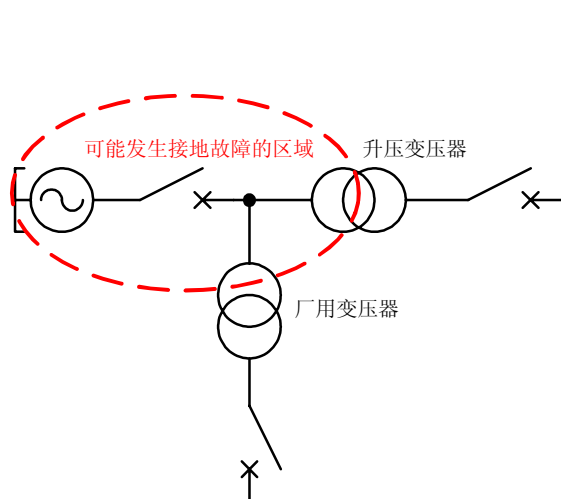


图 1: 发电厂典型的一次接线图

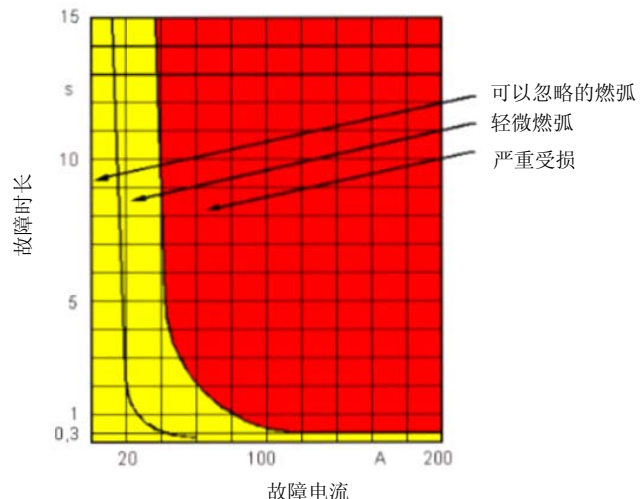


图 2: 故障电流和时间对定子铁心损坏的影响

在实践中, 有两种不同的方法计算必须的负载电阻阻值 R_L 。在文献 [1] 中, 对负载电阻的探讨从中性点绝缘的发电机在间歇性接地故障期间可能产生的暂态过电压的角度开始。中性点的接地电阻主要服从于限制暂态过电压, 但是必须在发电机定子允许的接地电流和暂态过电压之间找到一个平衡点。一般的设计原则如公式 (1) 所示:

$$R_L = \frac{1}{\omega \sum C_E} \quad (1)$$

式中 C_E 定子绕组对地总电容

根据文献 [1] 的描述，这种设计原则可以保证发生定子接地故障时，正常相上的最大暂态过电压限制到单相相对地电压的2.5 倍。

在文献 [2] 中表述了另一种观点，探讨的重点则放在升压变压器高压侧发生接地故障时可能导致定子接地保护误动作的风险上。参考图 3 中的示意，高压侧的零序电压可以通过电容分压器在发电机机端侧产生干扰信号。

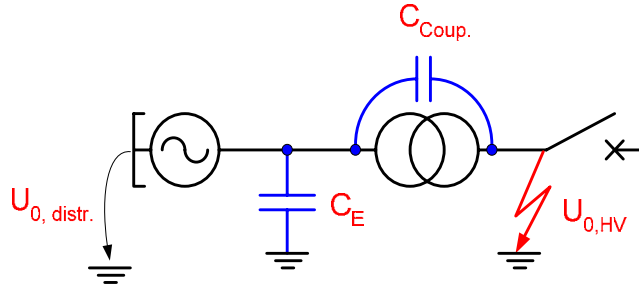


图 3：来自高压侧接地故障的干扰信号

发电机的负载电阻可以将高压侧接地时传递过来的零序电压干扰限制到最低，并且确定了定子接地保护的范 围（80%、90% 或者 95%）。

对于典型的一次接线方式，在给定的定子绕组对地电容和升压变压器耦合电容的情况下，两个不同的计算方法得出几乎相同的负载电阻。

示例：

保护范围为90 % 时： $K = 0.1$ ；

发电机额定电压： $U_{N,G} = 20 \text{ kV}$ ；系统额定电压： $U_{N,Net} = 550 \text{ kV}$ ； $f_N = 50 \text{ Hz}$

$C_E = 1.4 \mu\text{F/相}$ ； $C_{coup} = 10 \text{ nF}$

$$\text{方法 1：} \quad R_L = \frac{1}{\omega \sum C_E} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3 \cdot 1,4 \cdot 10^{-6}} \Omega = 758 \Omega$$

$$\text{方法 2：} \quad I_C \approx F_{\text{earth}} \cdot \frac{U_{N,Net}}{\sqrt{3}} \cdot \omega C_{\text{coup}} = 0.8 \cdot \frac{550 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \text{ A} = 0.8 \text{ A}$$

$$R_L \approx \frac{1}{2} K \frac{U_{N,G}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{2} \cdot 0,1 \frac{20 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \Omega = 721 \Omega$$

系数 $F_{\text{earth}} = 1$ 用于中性点绝缘系统。出于可靠性的考虑，在中性点固定接地（升压变压器的中性点可能不接地运行）的系统中，推荐将这个系数考虑为 0.8。通常，实际的零序电压会较低，而要求的负载电阻阻值大于计算值。

最后，我们探讨一下负载电阻的安装位置。通常，负载电阻采取接地变压器二次侧配置小电阻的等效电阻方式。一种配置方法是在发电机定子绕组星形接线侧配置中性点接地变压器。这种方案成本较低，但是存在一个风险。比如燃弧时，产生的弧光暂态过电压可能会烧坏中性点接地变压器的高压侧绕组，可能造成发电机中性点直接接地。因此，这种中性点接地方式的发电机，要求配置 100% 定子接地故障保护。

另外一个不同的优选方案，是让发电机的中性点完全悬空，定子绕组中性点侧不连接任何设备，这样将发电机中性点发生非预期性直接接地的风险降到最低。三相五柱式接地变压器连接在发电机机端，负载电阻接于二次侧开口三角绕组上（见 1.3 节，图 5）。

1.2 基于位移电压的定子接地保护

对于单元接线中的发电机定子接地故障保护，标准的方法是测量发电机定子的位移电压。由于位移电压中存在相当多的高次谐波分量（尤其是 3 次谐波分量）以及对定子接地保护的灵敏度要求很高，所以位移电压的测量量应该选择基波分量。只要负载电阻选取得合适，保护范围可达 90% 或者 95%。从微机保护的角度来说，这没有什么难度。在电压低时要求测量准确，这也是完全可能的。

对于抽水蓄能发电电动机的保护，尤其是发电电动机采用 $U/f = \text{常数}$ 的起动方式时，要求保护装置能够适应发电机非常宽广的运行频率范围。只有采用频率跟踪技术，才能保证在宽广的频率范围内保持同样的测量精度。在文献 [3] 中指出，西门子发电机保护装置的最低运行频率为 11 Hz。

1.3 外加 20Hz 交流电源的 100% 定子接地故障保护

由于发电机存在中性点附近发生接地故障的风险，因此需要研究一种更为安全的保护原理、采用完全不同的测量方法，以避免同原理保护的共性缺陷。另外，对于定子接地保护还有更高的要求，即保护的测量原理应该与发电机的运行工况无关。现在已经发现，发电机在起动过程中或大修以后发生定子接地故障的几率大于连续运行时。

上世纪七十年代，德国建造了一批大型的发电厂，电力部门要求使用一种更为安全可靠的定子接地测量原理。于是，西门子开发出了基于 20 Hz 电压的注入式原理，采用数字技术后其性能得到了永久的改进。

在图 4 中描述了这种测量方法的基本原理。在发电机的定子绕组中性点和地之间外加一个 20 Hz 的交流电压，该电压的幅值很小 ($< 1\%$ 的发电机额定电压)。当定子绕组发生接地故障时，通过接地电阻形成闭合回路，产生 20 Hz 的故障电流。这种测量接地故障的方法与定子绕组故障点的位置无关。这种方法还有一个优点，就是在发电机运转之前可以先投运定子接地保护。20 Hz 电压信号发生器必须先投运，然后才自动投入定子接地保护。

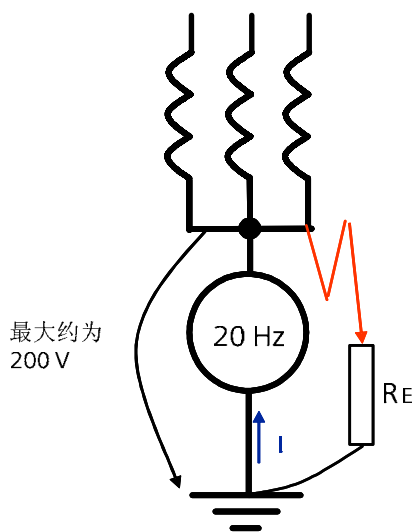


图 4: 20 Hz 低频交流电压注入方法的基本思路

图 5 对此进行了详细地图解，其中画出了必要的外部附加设备。图中的带通滤波器 7XT34 用于对 20 Hz 方波信号进行平滑处理，形成正弦波信号。同时，在机端定子接地故障中性点接地变压器二次绕组侧位移电压最大时，保护信号发生器 7XT33。注入接地变压器二次绕组侧的 20 Hz 电压来自负载电阻上的电压降：负载电阻和带通滤波器在 20 Hz 频率下的等效电阻 (8Ω) 共同组成了电阻分压器。因此，在设计负载电阻是要考虑最低阻值的要求。这个负载电阻的阻值要大于 $0.5\ \Omega$ （最差的情况下要大于 $0.3\ \Omega$ ）。这时，注入接地变压器二次绕组侧的 20 Hz 电压值接近于 $(0.5\ \Omega / 8.5\ \Omega) * 25\ \text{V} \approx 1.5\ \text{V}$ 。要获得较高阻值的负载电阻其实很容易，只要中性点接地变压器的二次侧电压取得较高或者一次侧电压按照发电机的单相对地额定电压（饱和程度参照发电机额定电压）选取就可以了。接地变压器的变比降低到 $1/\sqrt{3}$ 倍，二次侧的负载电阻就自动增大到原来的 3 倍。

微机保护装置采集注入电压和回路的测量电流，通过 FIR 滤波器滤出 20 Hz 的电压和电流分量，在此基础上建立一个特殊的“故障模型”来确定故障电阻阻值。采用接地电阻判据的好处，是可以获得比纯粹采用 20 Hz 接地电流判据更高的灵敏度。尤其是大型水电机组，由于其定子绕组存在很大的对地电容，因此在正常情况下回路中能够测量到较大的 20 Hz 容性电流。这时，纯粹采用 20 Hz 接地电流判据无法获得可靠的安全裕度。在

文献 [3] 中采用的模型就能够很好地削弱来自定子绕组对地电容的干扰。文献中给出了保护的推荐定值，并且描述了相关的调试步骤。

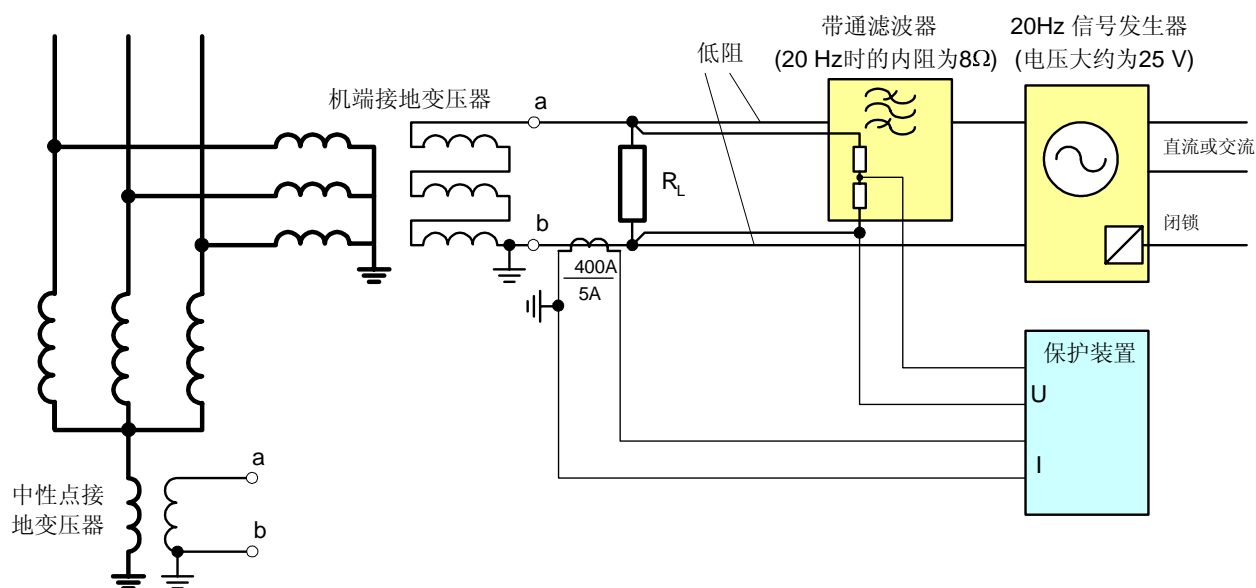


图 5: 20 Hz 低频交流电压注入方法的实际设计图

1.4 在不同电厂中的应用

大型电厂保护双重化的标准理念，是同一个保护功能要求采用两种独立的原理。对于定子接地保护，至少是一套保护采用位移电压原理，另一套保护采用 20 Hz 低频交流电压注入式原理。

两种原理的定子接地保护都要采用频率跟踪技术进行控制。在发电机动态运行于 10 Hz 到 40 Hz 过程中时，在发电机侧可以反应出频率接近 20 Hz 的位移电压信号。两个电压信号，一个来自于发电机，另一个来自于 20 Hz 信号发生器，相互叠加在一起产生类似于振荡的电压信号，从而导致 20 Hz 低频交流电压注入式的定子接地保护误动作（非预期性启动）。因此，必须在保护装置内部暂时闭锁 20 Hz 低频交流电压注入式的定子接地保护。抽水蓄能机组在起动（也可能通过静态变频起动）以及制动的过程中，定子接地保护这样处理尤为重要。

在图 6 中，对双重化配置时两种原理的定子接地故障保护，彼此之间在保护范围和运行频率上的配合作了综合图解。

最后，通过一个动作实例对 20 Hz 低频交流电压注入式的 100% 定子接地保护作出相应的诠释。在某大型水电机组的调试过程中，发电机机端安装了绝缘监视装置。这个绝缘监视装置临时出现故障，造成定子回路发生瞬时性接地故障。图 7 显示的是发电机保护装置 7UM62 的故障录波。从故障波形图上可以明显地看到暂态接地故障信号，其下面部分的开关量动作记录中也清楚地显示了保护的起动和跳闸过程。

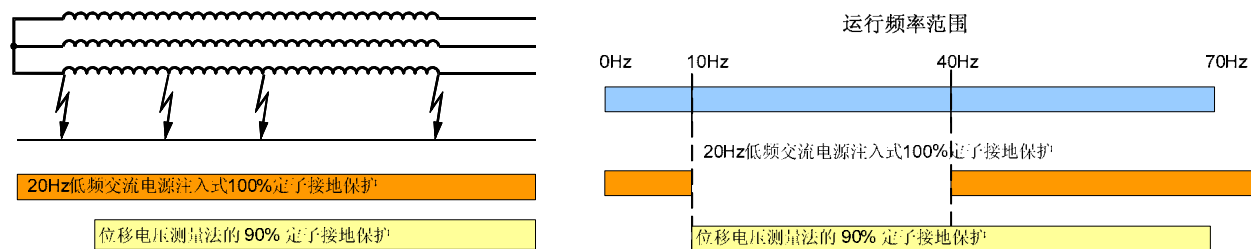


图 6: 定子接地保护的双重化配置与运行频率范围

通过这个故障录波，可以离线计算保护装置测量到的接地故障电阻轨迹，其结果显示在图 8 中。从轨迹图可以看出，在一段时间之内，测量电阻在虚线标注的跳闸门槛值（启动值为 60 Ω，返回值为 86 Ω，以上均为二次侧定值）以下。

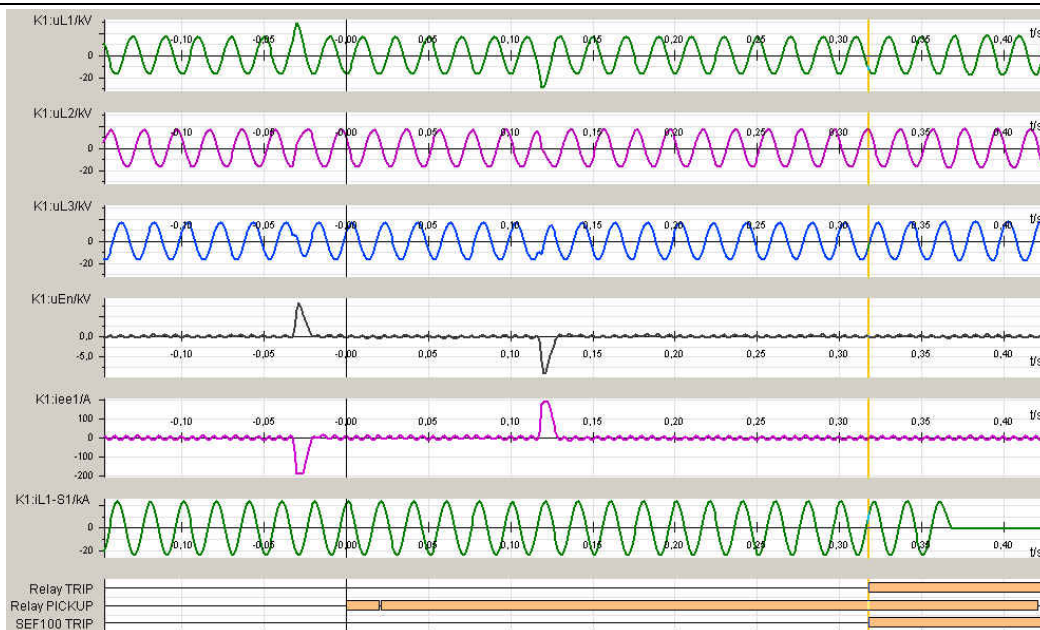


图 7：发生定子瞬时性接地时的保护录波

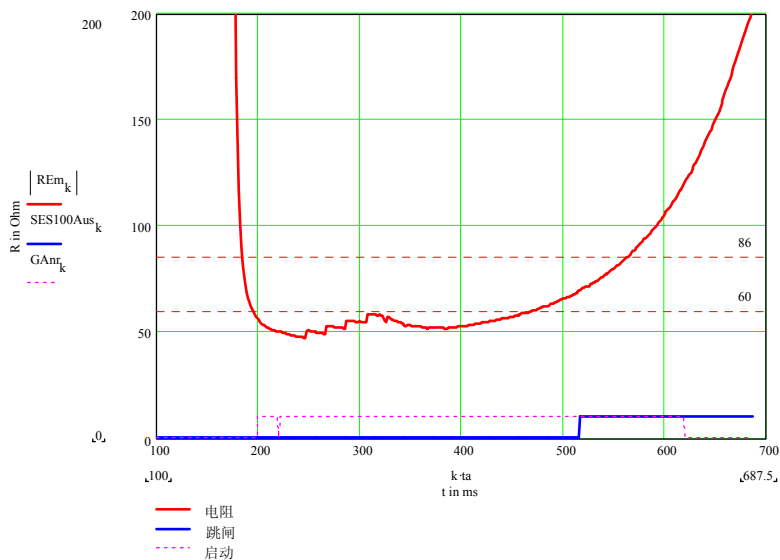


图 8： 离线计算得到的以上波形接地故障电阻轨迹

2. 转子接地故障保护

2.1 保护原理

在前面的介绍部分提到了，对于大型发电机来说配置灵敏的转子接地故障保护也是一项基本的保护要求。转子回路存在两点接地的风险，而这将严重地损坏发电机。因此，灵敏的转子接地保护必须要包括两段定值，一段用于告警信号，一段用于跳闸命令。

从测量的角度来看，由两个重要因素会影响到转子接地保护的灵敏度。一个是转子绕组的对地电容，另一个则是励磁系统中的各高次谐波。它们都在很大程度上影响保护的精度。

发电机的励磁系统是对地绝缘的，在发生转子一点接地故障时不能形成闭合回路。正是由于这个原因，必须往转子回路注入外部电源。一个广为应用的方案是注入工频信号，这个工频电压取自发电机机端电压互感器的二次侧，通过耦合电容连接到转子回路。在实践中，采用耦合电容的原理有不同的实现方法，其中一种方法如图 9 所示。这里，转子回路的对地电容会产生容性泄漏电流。如果仅采用接地电流判据的话，其灵敏度就会受到很大限制。如果故障模型中包括故障电阻和转子对地电容，那么就可以极大地削弱其中一个干扰源的影响，获得较高的灵敏度。从测量到的电压信号和电流信号，可以计算得到故障电阻，其灵敏度最高可达

30 kΩ。但是，在大部分情况下，来自励磁系统的各高次谐波干扰信号却降低了这个保护的灵敏度。因此，保护的告警段定值在实践中一般整定为10 kΩ到 15 kΩ。

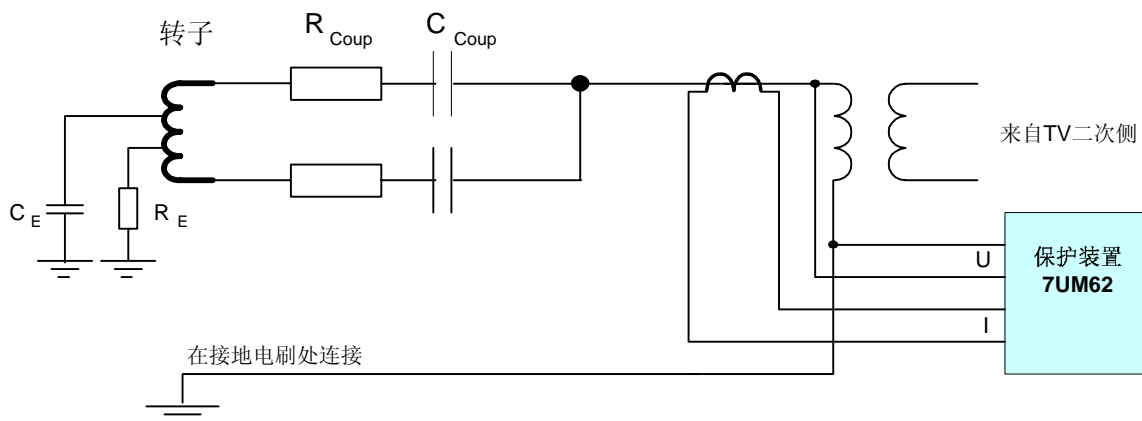


图 9: 交流电压注入式转子接地保护的接线原理图

外部电压注入式的转子接地保护还有另外一个解决方案，即注入低频方波电压。这种方法有两方面的好处，既可以削弱来自转子回路对地电容的干扰，又可以限制来自励磁系统各高次谐波的干扰。在干扰较低的情况下，转子接地电阻测量的灵敏度高达80 kΩ。更详尽的探讨，请见下面的章节。

如果在转子回路中同时采用两种不同原理的接地保护，那么由于注入信号彼此之间的干扰，会降低保护的灵敏度。交流原理会测量到方波低频原理并接在故障电阻上的耦合电阻（见图11），而对于低频方波原理来说，交流原理的耦合电容却又可以看作是转子回路一个很大的对地电容。这些电容不能充分地完成充电过程，从而会明显地降低低频方波原理转子接地保护的灵敏度。

在实践中，转子接地保护通常只采用一种测量原理。如果转子接地保护的回路自动监视功能检测到方波信号发生器故障，那么可以手动或通过逻辑控制自动切换到备用的方波信号发生器上（见图 10）。

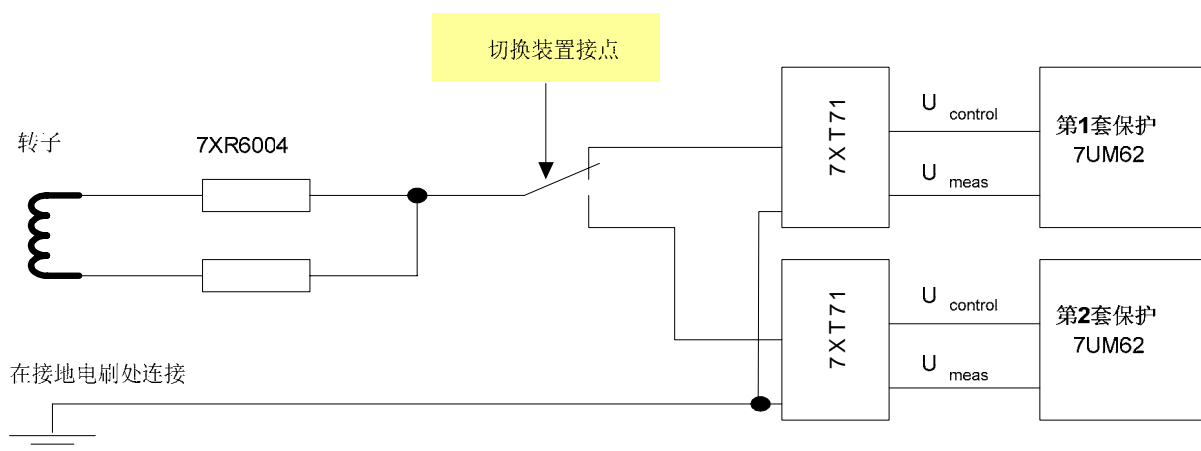


图 10: 外加切换设备的转子接地保护双重化接线示意图 文献[3]

2.2 1-3 Hz 低频方波注入式灵敏转子接地故障保护

这个原理的转子接地保护在模拟式的静态继电器上成功应用多年，其优越性能早已得到现场验证，并且已经移植到微机保护中。其基本原理和必要的外部附加设备都在图 11 上画出。从方波信号发生器7XT71 产生的信号频率范围从1 到 3 Hz，通过串接电阻7XR6004 (R_S)注入到转子回路，不断地对转子对地电容(C_E)充电。在这些电容完全充电以后，回路中就只流过由故障电阻(R_E)决定的接地电流。知道了注入转子回路的方波电压和回路的耦合电阻(R_S)以后，保护装置就可以计算出故障电阻的阻值。在励磁电压变动产生直流偏置电压时，为了防止转子接地保护误动作，算法中只采用方波正负极电压的差值。转子对地电容总是在正负两极时不断地充电。如果连续两个测量结果相同，那么就认为测量是有效的。通过这种方法，可以将励磁电压改变带来的测量误差降到最低。

注入低频方波电压的方法，其在励磁设备高次谐波下的噪声裕度要大大高于注入交流电压的方法，因此高次谐波分量对转子接地保护的干扰要低得多。前面已经提到，其灵敏度高达80 kΩ。通常，保护的告警段定值一般整定为40 kΩ到 80 kΩ，而跳闸段定值整定到5 kΩ左右。

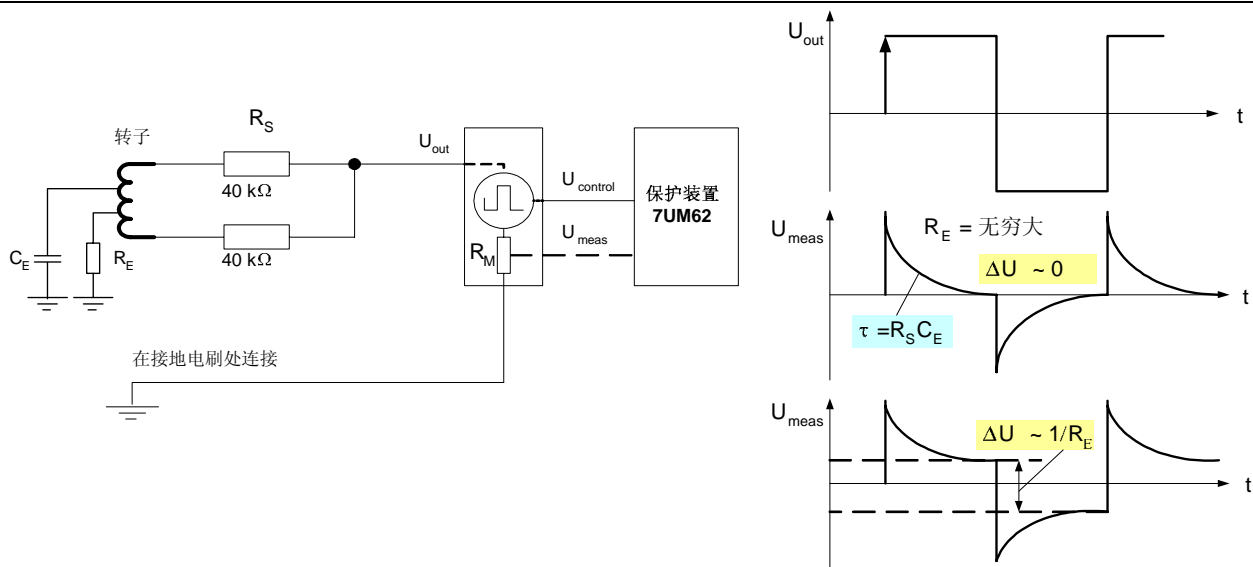


图 11： 低频方波电压注入原理

图 12 对测量原理给出了一个感性认识。这个波形是在调试过程中记录下来的，发电机容量为1000 MVA，励磁系统采用无刷励磁。图中第一条曲线为控制电压，用于触发保护测量和计算实际注入的方波电动势。第二条曲线为串联的测量电阻 R_M 上的电压降，请参见图 11。方波信号不同说明故障电阻阻值不同，这里，故障电阻是通过测试电阻来模拟的。在下面部分的开关量动作记录中，可以清楚地看到保护的起动和跳闸过程。跳闸命令延时定值为0.5 s。

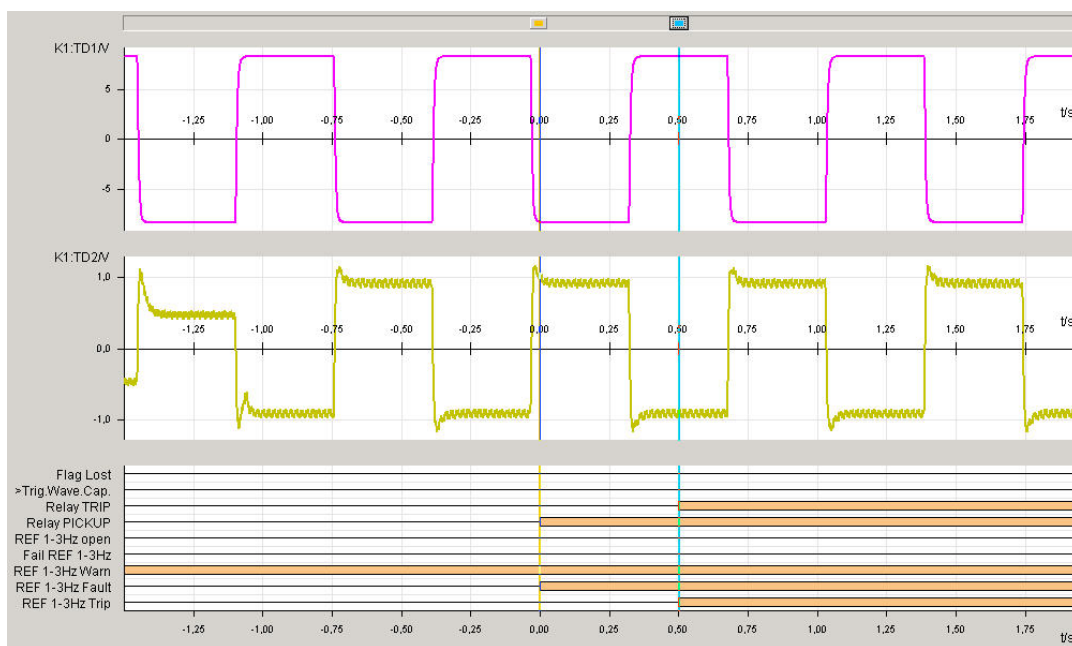


图 12： 调试过程中的1-3 Hz低频方波电压注入式转子接地保护录波

实践中经常关心的是，对于不同的励磁系统转子接地保护如何接线。对于机端静态励磁系统，推荐采用对称接线。虽然也可以采用不对称接线，但是串接电阻或电容必须要并联连接。图 13 标示出了不同的接线方式。

最后，简单地介绍一下测试方法。1-3Hz 低频方波注入式的转子接地保护包含有回路自动监视功能，可以探测到注入设备的故障。但是，不是所有的回路断线都能够检测出来。有时候，会发生某个串接电阻断线。此时，方波信号仅仅通过一个串接电阻(40 kΩ)注入转子回路。而在保护装置内部，假定的测量回路串接电阻是 20 kΩ而不是 40 kΩ，因此将产生测量误差。因此，必须激活保护的测试功能。只要告诉保护装置测试电阻的阻值，就能够可靠地探测到回路断线。也可以通过 CFC 逻辑进行自动测试，这时测试功能通过手动或者远方控制自动激活。详细的情况，请参考文献 [3]。

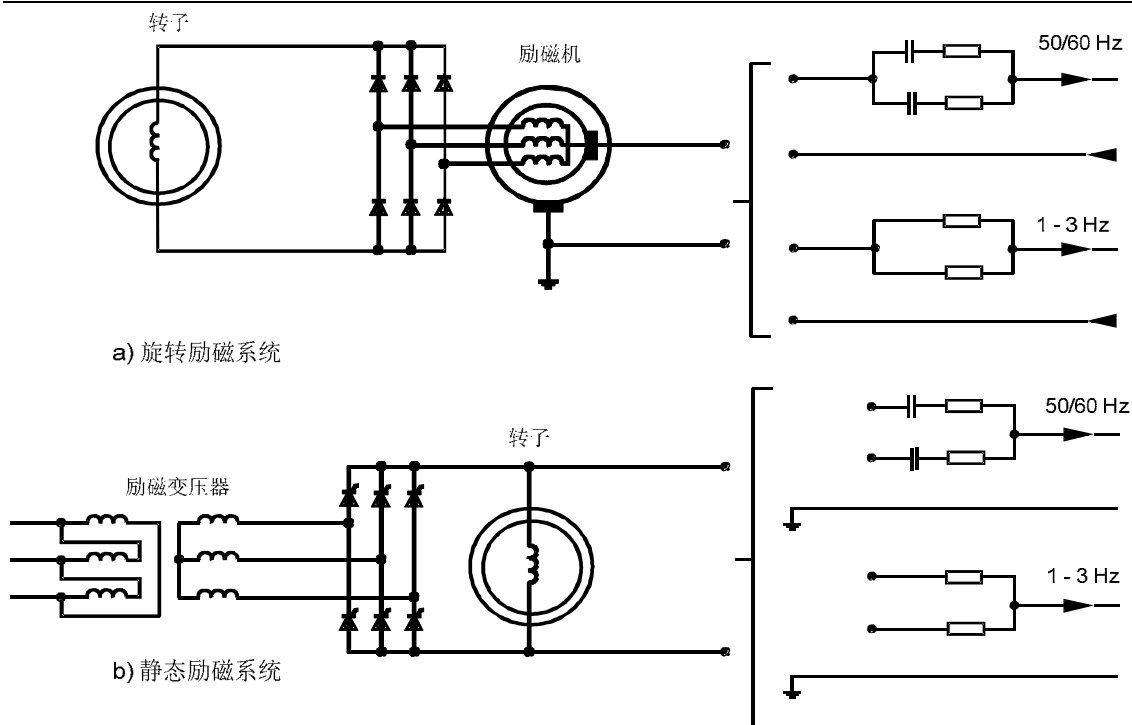


图 13: 不同励磁系统的转子接地保护接线示意

3. 总结

本篇文章探讨了大型机组保护中两个很重要的话题，即定子接地保护和转子接地保护。在大型发电厂中，以上基本功能都是采用这些保护原理。而水力发电厂尤其是抽水蓄能电厂，则要考虑其特殊的运行工况。

文中主要关注接地保护的灵敏度以及保护范围。可以清楚地看到，外加20 Hz交流电压原理的100% 定子接地保护能够保护整个定子绕组范围，并且基本上与发电机的运行工况无关。

1-3Hz低频方波注入式的转子接地保护表现出极高的灵敏度，保护能够探测到高阻值的转子接地故障。转子接地保护的标准整定方式中应该包括两段不同的定值，一段告警，一段跳闸。

本文也介绍了这两种接地保护在工程中的应用实例。

参考文献

- [1] IEEE Guide for the application of neutral grounding in electrical utility systems. Part II – Grounding of synchronous generator systems, published by IEEE, New York, 1989
- [2] Planning Machine Protection Systems, Siemens application guide, No. E50400-U0089-U412-A2-7600
- [3] SIPROTEC 7UM62 V4.6, Multifunction Generator, Motor and Transformer Protection Relay, Manual No C5300-G1176-C149-4

作者简介

Dr. Hans-Joachim Herrmann，生于 1952 年，1977 年毕业于德累斯顿技术大学，已经有 29 年从事继电保护的丰富经验。1977 年至 1991 年之间，在 Zittau 技术大学任助理教授。1991 年加入西门子公司，是西门子输配电集团能源自动化部门保护产品的管理层成员。截止目前，共发表过 60 左右的论文。主要著作有俄文版《继电保护》和德文版《微机保护》等。

高迪军，生于 1975 年，已经有 8 年从事继电保护的丰富经验。2004 年加入西门子电力自动化有限公司，从事发电机-变压器保护的技术应用和支持。