[发电机]

发电机注入式定子接地保护调试方法

文/朱同
上海电力建设启动调整试验所有限公司

发电机注入式定子接地保护调试通常以现场调试为主，经常出现设备参数更改，导致定子接地保护误动作，影响发电机正常运行的问题。因此，设计了发电机注入式定子接地保护调试方法。调试发电机注入式定子接地保护装置参数，检查发电机定子绕组的绝缘电阻。在确定绝缘性能良好的基础上，调试发电机注入式定子接地保护装置参数，确保定子接地保护装置能够正常工作。调整发电机注入电源频率，将发电机参数与电源内阻影响考虑在内，改变定子注入频率，使发电机机端产生谐波电压，实现注入式定子接地保护调试。采用对比实验的方式，验证该方法的调试效果更佳，能够应用于实际生产中。

发电机注入式定子接地保护调试，对于保障发电机的正常运行具有重要意义。在实际调试过程中，要严格遵守相关安全规定，按照厂家提供的调试说明书逐步进行调试工作，确保定子接地保护装置的灵敏度和可靠性达到要求。定子接地保护通常包含一定的固有延时机制，以避免误报和瞬态故障的干扰。然而，在某些情况下，这种延时可能会使故障持续时间延长，导致故障对发电机造成更严重的损害。针对此类问题，研究人员设计了多种调试方法。如大型水轮发电机消弧线圈接地方式下的注入式定子接地保护调试方法[1]，从接地端串接电阻器，并调试其两端信号，增加电阻器两端的阻抗，从而避免接地保护感抗失效的问题。基于内部故障仿真的发电机注入式定子接地保护调试方法[2]，结合发电机定子绕组状态，设计内部故障仿真模型，从中找出最优调试方案，实现定子接地的有效保护。以上两种方法在调试的过程中，均忽略了电源频率的影响，导致定子接地保护失效。

发电机定子接地保护是发电机保护系统中的关键部分，其主要目的是检测并迅速切除接地故障，避免故障扩大和损害发电机及电力系统的安全运行。因此，在已有研究的基础上，本文提出一种新的发电机注入式定子接地保护调试方法。

发电机注入式定子接地保护调试

1. 调试发电机注入式定子接地保护装置参数

在定子接地保护调试的过程中，确保调试现场安全，并遵守相关安全规定进行不带电操作[3]。选择合适的测试电压，并将测量线接头的连接紧固，避免影响调试结果。检查发电机定子绕组的绝缘电阻，在确定绝缘性能的基础上，调试发电机注入式定子接地保护装置参数，确保能够正常工作[4]。注入式定子接地保护的等效电路如图1所示。

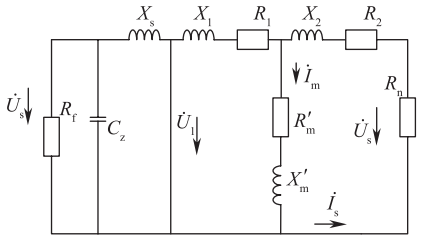

图1　注入式定子接地保护的等效电路

由图1可知，R_1、R_2为电源侧电阻和发电机电阻；X_1、X_2为电抗；X_s为定子绕组的等效电抗；R_f为接地电阻；C_z为定子绕组的三相总对地电容；$\dot{U}_s$为电压；R'_m为激磁电阻；R_n为接地电阻。由此得出接地电阻的公式为

$$R_f=\frac{n^2}{\mathrm{Re}\left\{\frac{\dot{I}_m}{\dot{U}_s-\dot{I}_m(R_1+jX_1)}-\frac{1}{R'_m+jX'_m}\right\}} \tag{1}$$

式中，R_f为接地电阻；n为变比；$\dot{I}_m$为电流；R_1为发电机电源等效漏电阻；j为常数；X'_m为激磁电感。

根据R_f的值，调试发电机注入式定子接地保护装置的参数。

2. 调整发电机注入电源频率

本文按照厂家说明书调整定子接地保护装置的接线与参数，确保保护装置能够正常工作。此外，添加三次谐波电压，并通过电压通道显示出与外加电压相等的电压值，满足定子接地保护准确度校核需求[5]。为避免发电机参数与电源内阻的影响，改变定子注入频率，使发电机机端产生谐波电压，实现对定子接地保护。

在发电机正常运行的工况下，在发电机机端三次谐波电压通道与中性点谐波电压通道中，分别加入三次谐波电压。其中，机端电压小于三次谐波电压，并整定接地电流值I_1、I_2，公式为

$$I=\begin{cases}I_f & I_1<I_2\\ I_n & I_1=I_2\end{cases} \tag{2}$$

式中，I为发电机端电流值；I_f为发电机失磁的电流值；I_n为转子低电流值。

当$I_1<I_2$时，发电机端电流输入端子相加电流，改变电流幅值，即可完成发电机端电流调试[6]。当$I_1=I_2$时，改变机端三相电流幅值，使机端低电流警示灯亮起，即可完成机端低电流定值调试。在发电机正常工作时，工频阻抗表示为

$$Z'=R_s+\mathrm{j}f_0\left(X'_m-X_1\right) \tag{3}$$

式中，Z'为发电机工频阻抗；R_s为注入回路的额定阻抗；f_0为发电机注入电源频率。

通过调整f_0，改变注入电源参数，使输出电压、输出电流和工频阻抗达到接地保护的标准。工频电感的额定电流为3.5 A时，最小电阻值为工频电抗的1.3%，忽略电阻对电感的影响，注入20 Hz频率信号，使发电机能够承受工频电压与谐振电压，确保定子接地保护的正常运行。

试验与分析

为验证本文方法是否满足发电机注入式定子接地保护调试需求，进行试验分析。最终的试验结果以文献[1]大型水轮发电机消弧线圈接地方式下的注入式定子接地保护调试方法、文献[2]基于内部故障仿真的发电机注入式定子接地保护调试方法，以及本文设计的发电机注入式定子接地保护调试方法的对比形式呈现。

1. 试验过程

本次试验选择发电机、定子接地保护装置、电源和模拟故障设备等，根据发电机注入式定子接地保护调试需求，准备万用表、示波器和绝缘电阻测试仪等仪器与工具。首先，将发电机与定子接地保护装置进行正确的接线连接，确保牢固可靠。然后，将电源连接到定子接地保护装置的电源输入端子，提供稳定可靠的供电。接着，通过连接示波器和万用表，准备好监测发电机产生的谐波电压信号和测量电流值、电压值等参数的能力。在连接完成后，对仪器与工具进行调试和校准，确保实验数据的准确性和可靠性。所有连接过程要遵循安全操作规程，确保连接牢固、正确无误，并进行适当的调试和校准。

根据上述过程建立连接后，利用MATLAB软件生成定子接地保护电路，如图2所示。

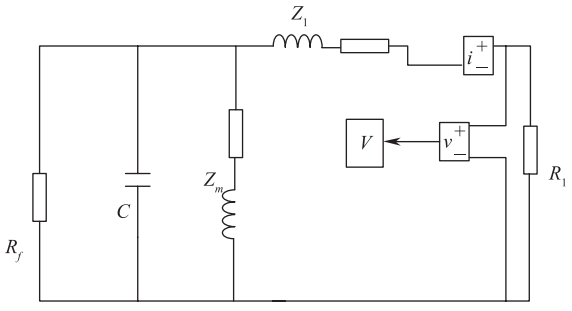

图2　定子接地保护实验图

图2中，Z_m、Z_1为定子绕组电阻；C为电容；V为电源电压。测试期间通过改变电源频率，得出U、I的值。再调试装置参数，将电源内阻设定为2.0 Ω，二次侧电阻设定为6.0 Ω，定子绕组漏电阻设定为0.289 Ω，绕组漏感抗设定为1.84×10^{-3} H，R'_m设定为129 Ω，发电机对地等效电容设定

为1.81×10^{-4} F。在此条件下进行实验，能够满足本次实验需求。

2. 试验结果

在上述试验条件下，将发电机注入电源频率进行调整，调整范围在10～100 Hz。通过改变电源频率，测得U、I的值，并根据式（1）计算出接地电阻。在其他条件均已知的情况下，分别采用文献[1]方法、文献[2]方法以及本文方法进行调试，试验结果见表1。

表1　试验结果

对比方法	调试结果				
	电源频率/Hz	U/V	I/A	接地电阻/Ω	接地保护电阻/Ω
文献[1]方法	10	18.16<－0.6°	0.41<18.3°	2 043.02	110.24
	12.5	18.18<－0.8°	0.42<24.8°	1 984.99	23.42
	15	18.19<－1.1°	0.44<31.2°	1 973.32	1 461.71
文献[2]方法	20	18.21<－1.6°	0.49<42.3°	1 991.33	79.62
	25	18.21<－2.1°	0.57<50.2°	1 952.98	52.43
	30	18.19<－2.6°	0.66<55.6°	1 937.64	36.74
本文方法	35	18.19<－3.1°	0.76<59.3°	1 908.95	12.54
	40	18.17<－3.6°	0.87<61.9°	1 870.94	13.41
	100	17.27<－11°	2.60<62.1°	1 254.96	10.77

在发电机注入式定子接地保护调试的过程中，接地电阻越小，定子绕组的绝缘电阻越小，定子接地保护装置性能和调试效果越佳。也就是说，接地保护电阻需要低于接地电阻，并在50 Ω以内，才能确保定子接地保护效果。

因此，在其他条件均一致的情况下，分析表1可知，使用文献[1]方法后，接地电阻相对较高，接地保护电阻在20～1 500 Ω的范围内变化，接地保护效果不佳。由此证明，该方法在电源频率调整为15 Hz时，接地保护装置未完成调试或调试效果不佳，导致接地保护电阻仍然超过1 000 Ω，影响发电机的安全运行。使用文献[2]方法后，电源频率从20 Hz调整到30 Hz，接地保护电阻在35～80 Hz的范围内变化，仍存在电阻超过50 Ω的情况，亟需对其进一步优化。而使用本文方法后，电源频率从35 Hz变化到100 Hz，接地电阻随之减小，接地保护电阻均低于15 Ω，能够有效地保护定子接地故障，避免定子绕组绝缘电阻增加，导致发电机失灵的问题。由此可见，使用本文方法能够成功调试发电机注入式定子接地保护装置，确保发电机的正常运行，符合本文研究目的。

结束语

发电机作为电力系统中的核心设备，其正常运行是保障电力供应的稳定性和可靠性的关键。发电机定子接地保护是保障其正常运行的有效措施，定子接地保护调试至关重要。因此，本文设计了发电机注入式定子接地保护调试方法。从参数调试、频率调整两个方面，完成定子接地保护调试。并以接地电阻的变化状态，判断定子接地保护调试效果，为发电机注入式定子接地保护调试提供一定的参考价值。EA

（收稿日期：2024-04-25）

参考文献

[1] 姜小龙，施利民．大型水轮发电机消弧线圈接地方式下的注入式定子接地保护新方案[J]．科技创新与应用，2022，12(20)：125-128．

[2] 尹项根，乔健，王义凯，等．基于内部故障仿真的可变速抽水蓄能发电电动机定子侧主保护优化配置研究[J]．电力系统保护与控制，2022，50(13)：1-10．

[3] 尹项根，王义凯，谭力铭，等．基于双频有源调控的大型机组定子接地故障电弧抑制及自适应保护[J]．电力系统保护与控制，2023，51(6)：1-9．

[4] 徐雯，王义凯，尹项根，等．基于零序电压有源调控的发电机定子接地故障消弧方法及保护对策[J]．电力自动化设备，2022，42(4)：197-202．

[5] 文聆安，林永源，熊华兵．基于零序电压阶梯式增加引起发电机定子接地保护动作故障分析[J]．内蒙古电力技术，2021，39(4)：69-72．

[6] 林晓明，梁敏健．一种基于模拟工况法的起重机电动机定子异常失电保护功能检测方法及仪器[J]．西部特种设备，2021，4(4)：40-47．