

双频注入式定子单相接地保护方案

贾文超¹, 黄少锋¹, 焦利霞²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003;
2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 从注入式定子接地保护灵敏度、滤波器参数设计和信号提取的简便性等方面对高频段注入信号频率的取值范围进行分析。分析结果表明:当注入频率大于 50 Hz 时,保护的灵敏度随注入频率的增加而降低,且滤波器电感所承受的谐振电压和工频电压随注入频率的增大而减小。最后确定了高频段信号的注入频率为 80 Hz。给出了一套双频注入式定子接地保护方案,该方案能实现发电机的全工况运行的接地保护功能。

关键词: 发电机; 定子接地保护; 双频注入式; 继电保护; 灵敏度分析

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.06.027

0 引言

发电机定子绕组与铁芯间绝缘破坏引起定子单相接地故障较普遍,目前国内外发电机定子单相接地保护主要有^[1]基于基波零序电压和 3 次谐波电压构成的 100% 定子接地保护、外加信号的注入式定子接地保护。基波零序电压保护简单可靠,但存在保护死区^[2-3];3 次谐波电压保护在运行中易误动,且灵敏度随定子绕组对地电容的增加而降低^[4-6]。近年来国内外学者针对 20 Hz 注入式定子接地保护开展了大量研究^[7-13],该保护用注入的 20 Hz 电气量计算单相接地电阻值,能 100% 保护发电机定子绕组接地故障,同时能对定子绕组进行绝缘老化监视。但该保护受发电机频率变化的影响,在发电机(特别是抽水蓄能机组)的启停机过程中不能实现全程保护,即在 10~40 Hz 期间要闭锁保护。文献^[14]提出了双频注入式定子接地保护,其基本原理为:先检测发电机的运行频率,当运行频率大于 10 Hz 且小于 40 Hz 时,注入信号频率取 100 Hz;当运行频率不大于 10 Hz 或不小于 40 Hz 时,注入信号频率取 20 Hz。但该保护原理在计算接地电阻时,需要变压器一次绕组和二次绕组漏阻抗参数,这在实际中较难获取。注入式保护的灵敏度受发电机定子绕组对地电容的影响,在发电机高阻接地故障时,注入信号频率较高,降低了保护的灵敏度,所以高频注入信号的选择仍需研究。

考虑 20 Hz 注入式定子接地保护相当成熟,本文仅对高频注入信号进行分析。本文主要从注入式定子接地保护灵敏度、滤波器参数设计和信号提取方便性 3 个方面研究高频段注入信号频率的取值范围,确定了高频信号的注入频率和注入方式,给出了一种新的双频注入式定子接地保护方案。

1 注入信号频率的选择分析

注入信号频率的选择需要考虑保护灵敏度、滤

波器参数设计、频率提取的方便性等因素,本文主要从保护灵敏度、滤波器参数设计和频率提取方便性 3 个方面进行分析。

1.1 考虑保护灵敏度的注入信号频率选择

注入式定子接地保护的灵敏度高通常是以保护区内任一点发生接地故障时,保护装置刚好能动作所允许的最大接地电阻值(与故障点位置有关)中的最小值来表征^[15]。

1.1.1 注入式定子接地保护灵敏度分析

发电机定子单相接地故障时,注入式定子接地保护的等效电路如图 1 所示。图中, R'_1 、 X'_1 和 R_2 、 X_2 分别为配电变压器一次侧和二次侧的电阻和电抗; R'_m 和 X'_m 分别为配电变压器的励磁电阻和励磁电抗; X'_s 为定子绕组的等效短路电抗; R'_g 为定子绕组接地电阻; C_{Σ} 为定子绕组对地三相总电容; R_n 为配电变压器的接地电阻; U_{set} 和 I_{set} 分别为保护测量的频率为 20 Hz 的电压和电流; I_m 为励磁支路电流; U_R 为接地故障电阻上的电压; U_1 为发电机中性点的 20 Hz 电压。以上所有参数均已归算至变压器的二次侧。

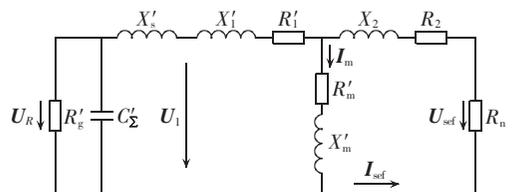


图 1 注入式定子接地保护的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of stator grounding protection with injecting source

目前,注入式定子接地保护计算接地电阻时对漏阻抗的影响进行补偿,考虑变压器漏阻抗和励磁支路影响,漏电阻 $R_{\sigma} = R'_1 + R_2$,漏电抗 $X_{\sigma} = X'_1 + X_2$,变压器变比为 n ,得接地电阻的测量值表达式为:

$$R_G = \frac{n^2}{\operatorname{Re} \left[\frac{I_{set}}{U_{set} - I_{set}(R_{\sigma} + jX_{\sigma})} - \frac{1}{R_m + jX_m} \right]} \quad (1)$$

接地电阻的一次侧实际值为:

$$R_g = n^2 / \text{Re}[(I_{\text{sef}} - I_m) / U_R] \quad (2)$$

定义保护的测量误差为:

$$e = (R_g - R_g) / R_g \times 100\% \quad (3)$$

令 $\Delta U = U_{\text{sef}} - \Delta U_1 - I_{\text{sef}}(R_\sigma + jX_\sigma) + U_1 - U_R$, ΔU 主要由定子绕组的短路电抗电压和变压器补偿电压的不准确度两部分构成,其中变压器补偿电压的不准确度为 $U_{\text{sef}} - U_1$ 与 $I_{\text{sef}}(R_\sigma + jX_\sigma)$ 的差值。

分析式(1)和(2)可得:注入式定子接地保护的测量误差主要受 $|\Delta U / U_R|$ 和励磁支路电流的影响。 $|\Delta U / U_R|$ 的大小与发电机定子绕组对地分布电容和注入信号频率有关,其与分布电容成正比。由励磁支路分流引起的测量误差随注入频率增大而减小,但 $|\Delta U / U_R|$ 随注入频率增大而增大,且在高频段注入频率时,由励磁支路引起的误差很小, $|\Delta U / U_R|$ 对测量误差起主要作用。综合分析可得,测量误差随分布电容和注入信号频率增大而增大。

保护的灵敏度分析应考虑最不利于保护动作的条件,故本文分析灵敏度时考虑当发电机定子电容很大,注入高频信号时,保护允许误差范围内发电机机端单相接地短路所能检测到的最大接地电阻值。

1.1.2 注入信号的频率范围分析

ABB 公司设计的注入式定子接地保护要求:测量电阻为 $100 \Omega \sim 10 \text{ k}\Omega$ 时,保护的测量误差在区间 $(-10\%, 10\%)$ 内;测量电阻为 $0 \sim 100 \Omega$ 、 $10 \sim 20 \text{ k}\Omega$ 时,保护的测量误差在区间 $(-20\%, 20\%)$ 内。国内某继电保护制造厂家设计的注入式定子接地保护,要求测量电阻在 $0 \sim 10 \text{ k}\Omega$ 时,保护的测量误差在区间 $(-5\%, 5\%)$ 内。本文先不考虑电流互感器的传变误差、A/D 转换误差、微机保护算法误差,并设计接地故障电阻为 $10 \text{ k}\Omega$ 时保护的测量误差不超过 5%。

算例参数如下。

a. 定子绕组对地电容:注入式定子接地保护一般适用于发电机三相总电容 C_Σ 取 $0.5 \sim 10 \mu\text{F}$ 时。目前可查的发电机定子绕组每相最大对地电容为 $2.03 \mu\text{F}$ (三峡 2 号机组),考虑到与发电机相连的其他设备对对地电容的影响和最严苛的条件,取 $C_\Sigma = 10 \mu\text{F}$ 进行分析。

b. 配电变压器参数:配电变压器 DDBC-50/20^[16],变比 $n = 20 \text{ kV} / 0.865 \text{ kV}$,漏电阻 $R_\sigma = 0.289 \Omega$,漏电感 $L_\sigma = 1.84 \times 10^{-3} \text{ H}$,励磁电阻 $R_m = 129 \Omega$,励磁电感 $L_m = 1.505 \text{ H}$ 。配电变压器参数均归算到二次侧。

c. 基于 MATLAB 建立仿真模型,对接地电阻 $R_g = 10 \text{ k}\Omega$ 的情况进行仿真分析,采用不同注入信号频率,由式(3)计算接地电阻的测量误差如表 1 所示,测量误差与频率的关系如图 2 所示。

由表 1 分析可得,考虑接地故障电阻为 $10 \text{ k}\Omega$ 时

表 1 $C_\Sigma = 10 \mu\text{F}$ 、 $R_g = 10 \text{ k}\Omega$ 时保护的测量误差
Tab.1 Measurement error when $C_\Sigma = 10 \mu\text{F}$ 、 $R_g = 10 \text{ k}\Omega$

注入频率/Hz	测量值/k Ω	误差/%
60	10.127	1.27
70	10.147	1.47
80	10.233	2.33
90	10.418	4.18
100	10.713	7.13

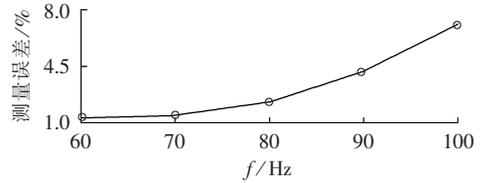


图 2 测量误差与频率的关系曲线

Fig.2 Relation between measurement error and frequency

保护的测量误差不超过 5%,注入频率应小于 90 Hz。

1.2 注入信号频率与滤波器的参数选择

注入滤波器设计要同时考虑提高工频抑制电压和控制谐振过电压。模拟带通滤波器是基于 RLC 串联谐振电路实现的,其 LC 参数设计和注入频率的大小有关。本文分析了滤波器参数和注入信号频率的关系,并从提高工频抑制电压和控制谐振过电压的角度分析了注入频率的范围。

50 Hz 工频反馈电压的注入回路等效电路如图 3 所示。图中, u_{F50} 为 50 Hz 工频电压; R 、 L 、 C 分别为注入回路中滤波器的等效电阻、滤波电感、滤波电容; Z_x 为方波发生器的吸收阻抗。

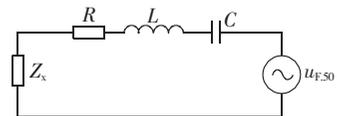


图 3 50 Hz 工频反馈电压的等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of 50 Hz feedback voltage

由图 3 得,注入滤波器的工频阻抗表达式为:

$$Z_{50} = R + j(X_{L50} - X_{C50}) = R + j100\pi L[1 - (f_0/50)^2] \quad (4)$$

其中, f_0 为滤波器工作频率; X_{L50} 为滤波电感在 50 Hz 时的工频电抗; X_{C50} 为滤波电容在 50 Hz 时的工频容抗。

滤波电感表达式为:

$$L = \sqrt{Z_{50}^2 - R^2} / [100\pi |1 - (f_0/50)^2|] \quad (5)$$

滤波电容表达式为:

$$C = 1 / [(2\pi f_0)^2 L] \quad (6)$$

注入电源的设计参数为:输出电压 $U = 28 \text{ V}$;额定电流 $I_N = 3.5 \text{ A}$;注入回路的额定阻抗 $Z_N = 8 \Omega$;方波发生器的吸收压降不超过工频电压的 5%;滤波器最大工频抑制电压设定为 600 V 。

当最大工频反馈电压确定时,可根据方波发生器的过电压承受能力确定滤波器的最小工频阻抗 $Z_{50\text{min}}$ 。考虑足够的阻抗裕度,取方波发生器的吸收阻

抗等于注入回路额定阻抗值,可得滤波器的最小工频阻抗为:

$$Z_{50\min}=8 \div 5\%=160(\Omega)$$

根据经验数据,额定电流为 3.5 A 的工频铁芯电感的最小等效电阻仅为工频电抗的 1.3%。忽略电阻 R ,由式(5)、(6)可计算出不同注入频率下的滤波电感和滤波电容。滤波器的元件参数及其承受的电压与注入信号频率的关系如表 2 所示,其中 U_{L_f0} 为注入信号频率时电感承受的谐振电压, U_{L50} 和 U_{C50} 分别为工频 50 Hz 时的电感电压和电容电压。电感上谐振电压和工频电压与频率的关系曲线如图 4 所示。

表 2 滤波器的元件参数及所受电压的计算结果

Tab.2 Parameters of filter and calculative voltage borne by it

f_0/Hz	L/mH	$C/\mu\text{F}$	U_{L_f0}/V	U_{L50}/V	U_{C50}/V
20	605	105	266	712	113
60	1156	6	1525	1361	1990
70	530	10	815	624	1194
80	320	12.38	563	377	965
90	227	13.79	449	267	866
100	170	14.90	373	200	800

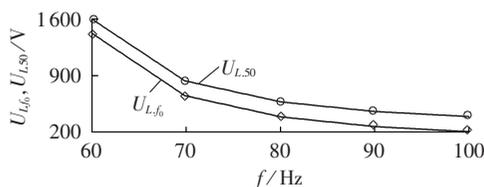


图 4 电感上谐振电压和工频电压与频率的关系曲线

Fig.4 Relation between resonant/fundamental voltage and frequency

由表 2 可得,当注入频率在 60~70 Hz 时,正常工作时 $L-C$ 元件所承受的谐振电压和工频电压较高。参考注入 20 Hz 频率信号时电感的谐振电压和工频电压,高频信号注入频率宜大于 80 Hz。

1.3 注入信号频率选择

目前 20 Hz 注入信号的保护算法是利用傅氏算法提取 10 Hz 频率的 2 次谐波分量。考虑信号提取的方便性,高频信号注入频率宜选择 10 Hz 的整数倍信号。

综合考虑保护灵敏度和滤波器参数设计和信号提取的方便性,高频段注入信号频率选择 80 Hz,低频段注入信号频率选择运行成熟的 20 Hz。

2 双频注入式定子接地保护方案设计

2.1 信号注入方式选择

考虑到 20 Hz 注入式定子接地保护的运行经验相当成熟,故在发电机全工况运行时始终注入 20 Hz 电压信号。当保护检测到定子绕组单相接地故障时,投入 80 Hz 注入式定子接地保护,采用该注入方式

即解决了现有的 20 Hz 注入式定子接地保护在发电机启动过程中为了防止误动需要闭锁的问题,又避免了切换开关频繁动作引起的开关损耗。

2.2 双频注入式定子接地保护的基本原理

为了提高注入式保护的灵敏度,实现对发电机全工况运行进行保护,本文研究的双频注入式定子接地保护设置低定值跳闸段和高定值报警段,2 段保护均带延时。

低定值段保护的動作判据:

$$\begin{cases} R_{g,20} \leq R_{\text{set},L20} \\ R_{g,80} \leq R_{\text{set},L80} \\ I_{\text{set}} > I_{\text{safe}} \end{cases} \quad (7)$$

高定值段保护的動作判据:

$$\begin{cases} R_{g,20} \leq R_{\text{set},H20} \\ R_{g,80} \leq R_{\text{set},H80} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $R_{g,20}$ 、 $R_{\text{set},L20}$ 、 $R_{\text{set},H20}$ 分别为注入信号频率为 20 Hz 时的接地测量电阻、低定值和高定值; $R_{g,80}$ 、 $R_{\text{set},L80}$ 、 $R_{\text{set},H80}$ 分别为注入信号频率为 80 Hz 时的接地测量电阻、低定值和高定值; I_{safe} 为安全电流限制定值。

双频注入式定子接地保护的逻辑框图见图 5。

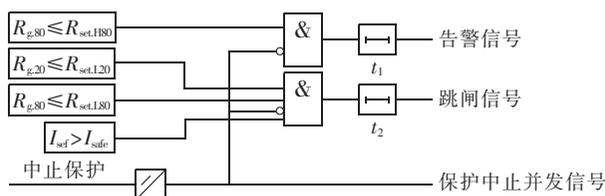


图 5 双频注入式定子接地保护逻辑框图

Fig.5 Logic diagram of generator stator grounding protection with double-frequency injecting source

当定子绕组单相接地时,测量 20 Hz 注入信号并计算接地电阻。当 $R_{g,20} \leq R_{\text{set},L20}$ 时,切换开关投入 80 Hz 注入式定子接地保护;当 $R_{g,80} > R_{\text{set},L80}$ 时,表明无故障发生,投切开关延时断开;当 $R_{g,80} \leq R_{\text{set},L80}$ 时,发出跳闸命令,延时跳闸;当 $R_{g,80} \leq R_{\text{set},H80}$ 时,发出告警信号。

3 结论

本文从注入式定子接地保护灵敏度和滤波器参数设计等方面分析了高频段注入信号频率的取值范围,给出了一种新的双频注入式定子接地保护方案。该保护方案既解决了现有的 20 Hz 注入式定子接地保护在发电机启动过程中为了防止误动需要闭锁的问题,又避免了切换开关频繁动作引起的开关损耗。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京:中国电力出版社,2002:223-245.
- [2] 姚晴林,郭宝甫,解波,等. 大型发电机基波零序过流过压保护新方案研究[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(14):1-3.
YAO Qinglin, GUO Baofu, XIE Bo, et al. Research on zero-sequence fundamental over-current and over-voltage protection

- of large generator[J]. Power System Protection and Control,2008,36(14):1-3.
- [3] 党晓强,邵能灵,王海田,等. 大型水轮发电机定子接地方式及其继电保护的相关问题分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):25-29.
DANG Xiaoliang,TAI Nengling,WANG Haitian,et al. Analysis of stator grounding modes of large-scale hydro-generator and its protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):25-29.
- [4] 毕大强,王祥珩,王维俭. 基于三次谐波电压故障暂态分量的发电机定子单相接地保护方案研究[J]. 电力系统自动化,2003,27(13):45-49.
BI Daqiang,WANG Xiangheng,WANG Weijian. Protection scheme based on fault transient component of third harmonic voltage for stator ground fault of generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(13):45-49.
- [5] 卢琪. 提高三次谐波电压式定子接地保护动作可靠性的措施[J]. 电力自动化设备,2008,28(1):119-121.
LU Qi. Reliability of stator grounding protection based on 3rd harmonic voltage[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(1):119-121.
- [6] 党晓强,邵能灵,刘俊勇,等. 绝缘状况原理在大型水轮发电机3次谐波量接地保护中的应用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(34):129-134.
DANG Xiaoliang,TAI Nengling,LIU Junyong,et al. Application of ground insulation state to improve ground fault protection using third harmonic voltage for huge hydraulic generator [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(34):129-134.
- [7] 曾祥君,尹项根,陈德树,等. 注入信号法补偿式高灵敏度发电机定子接地保护[J]. 中国电机工程学报,2000,20(11):51-55.
ZENG Xiangjun,YIN Xianggen,CHEN Deshu,et al. Ground fault protection for generator stator windings with inductance compensating based on injecting signal[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(11):51-55.
- [8] 毕大强,刘春秋,葛宝明. 注入式发电机定子接地保护的自适应整定[J]. 电力系统自动化,2010,34(16):64-68.
BI Daqiang,LIU Chunqiu,GE Baoming. Self-adaptive setting for injecting source based stator ground fault protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(16):64-68.
- [9] 刘春秋,葛宝明,毕大强. 20 Hz 注入式定子接地保护在扩大单元接线发电机组上的应用[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(3):40-45.
LIU Chunqiu,GE Baoming,BI Daqiang. Application of injecting 20 Hz source-based stator ground fault protection for generators in expanded unit connection[J]. Power System Protection and Control,2011,39(3):40-45.
- [10] 张琦雪,陈佳胜,陈俊,等. 大型发电机注入式定子接地保护判据的改进[J]. 电力系统自动化,2008,32(3):66-69.
ZHANG Qixue,CHEN Jiasheng,CHEN Jun,et al. Improvement on criterions of stator earth fault protection with voltage injection for large-sized generator[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(3):66-69.
- [11] TURNER S. Applying 100% stator ground fault protection by low frequency injection for generators[C]//Proceedings of IEEE Conference on Power & Energy Society. Calgary,Canada:IEEE,2009:1-6.
- [12] 刘亚东,王增平,苏毅,等. 注入式定子接地保护的现场试验、整定和分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):150-154.
LIU Yadong,WANG Zengping,SU Yi,et al. Field test,setting and analysis of injecting source-based stator grounding protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):150-154.
- [13] 兀鹏越,陈飞文,黄旭鹏,等. 1036 MW 机组注入式定子接地保护调试及动作分析[J]. 电力自动化设备,2011,31(3):147-150.
WU Pengyue,CHEN Feiwen,HUANG Xupeng,et al. Commissioning and operational analysis of voltage-injection stator grounding protection for 1036 MW unit[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(3):147-150.
- [14] 毕大强,王祥珩,王维俭. 一种双频注入式发电机定子接地保护方法,中国:200810172029[P]. 2009-04-22.
- [15] 王维俭,侯炳鑫. 大型机组继电保护理论基础[M]. 2版. 北京:水利电力出版社,1989:269.
- [16] 弋东方. 电力工程电气设备手册(电气一次部分)——电力工业部西北电力设计院[M]. 北京:中国电力出版社,1998.

作者简介:



贾文超

贾文超(1984-),男,河北保定人,讲师,博士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:jiawenchao_snow@163.com);

黄少锋(1958-),男,福建福州人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统微机保护等;

焦利霞(1986-),女,河南新乡人,硕士,主要研究方向为电力系统发电机保护。

Stator single-phase grounding protection with double-frequency injecting source

JIA Wenchao¹,HUANG Shaofeng¹,JIAO Lixia²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: The range of high-frequency injecting source for generator stator grounding protection is analyzed from the aspects of protection sensitivity, filter parameter design and signal extraction simplicity. Result shows that, when the frequency of injecting source is higher than 50 Hz, the protection sensitivity decreases along with the frequency increase and the resonant voltage and fundamental frequency voltage exerted upon the inductor of filter reduce along with the frequency increase. The high-frequency injecting source is confirmed to be 80 Hz and a scheme of stator grounding protection with double-frequency injecting source is then proposed, which realizes the generator stator grounding protection in all operating conditions.

Key words: electric generators; stator grounding protection; double-frequency injecting source; relay protection; sensitivity analysis