

基于导纳特性的水轮发电机失磁保护新判据

沈全荣, 陈佳胜, 陈俊, 郭自刚, 王光

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 传统水轮发电机失磁保护多采用阻抗原理或导纳原理的静态稳定边界判据, 在实践中得到广泛应用, 但也存在一定问题。通过对凸极发电机失磁过程的直接推导, 获得水轮发电机的水滴状失磁静态稳定极限导纳曲线, 无需进行拟合。据此提出一种导纳原理失磁保护新判据, 可真实反映水轮发电机静态稳定边界, 且整定方便, 应用效果良好。

关键词: 失磁; 导纳判据; 凸极发电机; 静态稳定边界; 水滴状曲线

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.033

0 引言

发电机失磁是常见的故障形式, 特别是大型机组, 励磁系统的环节较多, 增大了发生失磁的概率。历年全国电力系统主设备故障调查统计显示, 发电机故障中, 失磁故障所占的比重相当大。

发电机失磁后将过渡到异步运行状态, 转子出现转差, 定子电流增大, 定子电压下降, 有功功率下降, 无功功率反向并增大, 电力系统的电压下降。这些量的变化在一定条件下将破坏电力系统的稳定运行, 威胁发电机本身的安全。

近年来, 大型水电机组的建设比较迅速, 对于失磁保护也提出了更高的要求。对于水轮发电机等凸极发电机, 通过几何作图法获得的特性为一水滴状曲线。已有的失磁保护限于装置硬件计算处理能力, 无法按照其实际特性来构成判据; 常规失磁保护定子判据多采用苹果圆阻抗特性、静态稳定阻抗圆加电抗线特性、两段式导纳线判据^[1-3]等近似拟合的方案来实现, 并不能完全真实地反映凸极机失磁时的静态稳定边界, 某些工况下存在不正确动作的情况。

本文根据凸极发电机的静态稳定导纳边界特征, 提出了基于静态稳定导纳边界的凸极发电机失磁保护定子判据, 并可与其他判据配合以实现完善的失磁保护。

1 凸极发电机静态稳定导纳特性推导

水轮发电机、抽水蓄能机组等凸极发电机由于直轴同步电抗和交轴同步电抗不相等, 其静态稳定边界与隐极发电机有很大差别。

对于凸极发电机而言, 在稳态情况下, 无穷大电源母线处通过的有功和无功功率^[4-5]分别为:

$$P_s = \frac{E_q U_s}{x_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U_s^2}{2} \left(\frac{1}{x_{q\Sigma}} - \frac{1}{x_{d\Sigma}} \right) \sin(2\delta) \quad (1)$$

$$Q_s = \frac{E_q U_s}{x_{d\Sigma}} \cos \delta - \frac{U_s^2}{x_{d\Sigma}} - U_s^2 \left(\frac{1}{x_{q\Sigma}} - \frac{1}{x_{d\Sigma}} \right) \sin^2 \delta \quad (2)$$

$$x_{d\Sigma} = X_d + x_s, \quad x_{q\Sigma} = X_q + x_s$$

其中, P_s 、 Q_s 分别为发电机向系统输送的有功功率、无功功率; δ 为发电机功角; E_q 为发电机电势; U_s 为系统侧电压; X_d 、 X_q 分别为发电机直轴同步电抗、交轴同步电抗; x_s 为系统联系电抗。

母线处的静态稳定导纳边界为:

$$Y_s = \frac{\hat{S}}{U_s^2} = \frac{P_s - jQ_s}{U_s^2} = \frac{a \tan \delta_j \sin^2 \delta_j + j \left(a \cos^2 \delta_j + \frac{1}{x_{d\Sigma}} \right)}{U_s^2} \quad (3)$$

其中, $a = \frac{x_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}}$, 对于给定的 P_s 、 Q_s , a 均对应于一个确定的静态稳定极限角 δ_j 。

已知母线处测量导纳 Y_s , 则可以求出机端测量阻抗为:

$$Z = R + jX = \frac{1}{Y_s} + jx_s \quad (4)$$

$$R = \frac{a \tan \delta_j \sin^2 \delta_j}{(a \tan \delta_j \sin^2 \delta_j)^2 + \left(a \cos^2 \delta_j + \frac{1}{x_{d\Sigma}} \right)^2} \quad (5)$$

$$X = x_s - \frac{a \cos^2 \delta_j + \frac{1}{x_{d\Sigma}}}{(a \tan \delta_j \sin^2 \delta_j)^2 + \left(a \cos^2 \delta_j + \frac{1}{x_{d\Sigma}} \right)^2} \quad (6)$$

由机端测量阻抗可以求出机端导纳 Y :

$$Y = \frac{1}{Z} = G + jB \quad (7)$$

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2} \quad (8)$$

$$B = \frac{-X}{R^2 + X^2} \quad (9)$$

根据上述公式可得凸极发电机的失磁故障静态稳定导纳特性曲线如图 1 所示, 图中阴影部分为动作区。

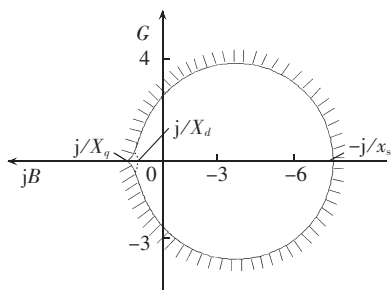


图 1 凸极发电机失磁故障静态稳定导纳特性
Fig.1 Admittance characteristic of static stability limit of salient pole generator with LOE fault

2 凸极发电机失磁保护导纳判据应用现状

凸极发电机失磁保护导纳判据见图 2。从目前的文献^①、^[6]可见,现有的失磁保护导纳判据多采用图 2 中点划线所示的两段式导纳特性。

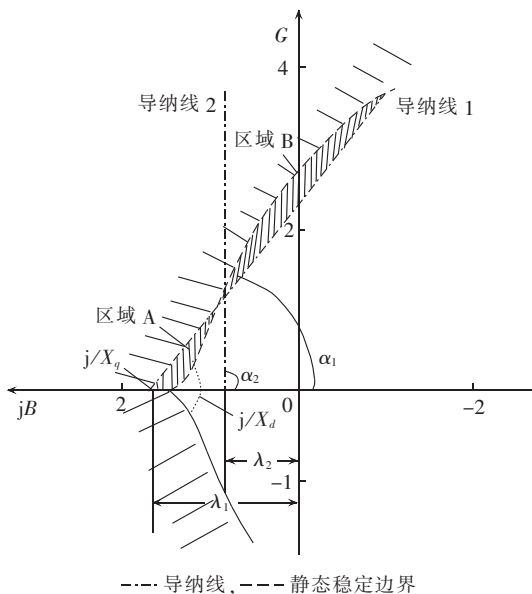


图 2 凸极发电机失磁保护导纳判据
Fig.2 Admittance criterion of LOE protection for salient pole generator

图 2 中,导纳线 1 按照静态稳定极限乘以系数 1.05 考虑,倾角 α_1 在 $60^\circ \sim 80^\circ$ 之间取值;导纳线 2 按照 90% 的 $1/X_d$ 考虑,倾角 α_2 取 90° 。很明显,图 2 中导纳线 1、2(图 2 中点划线)交叉形成的导纳动作特性不能与凸极发电机的实际静态稳定边界特性(图 2 中虚线)很好地吻合,缺少了图 2 中的区域 A,多了区域 B,人为改变了失磁保护的動作区域。因此,现有的导纳判据不能很好地反映凸极发电机组的失磁故障。

为了真实反映水电机组等凸极发电机的失磁故障,采用凸极发电机的实际导纳静态稳定边界来实际失磁保护。这样既防止了失磁保护在轻载、进相等运行工况下的误动,也不会出现用导纳线 1、2 组

合判据来拟合静态稳定边界时,因整定不合理可能导致的失磁保护不正确动作。

3 凸极发电机失磁保护导纳原理新判据及其实现

3.1 定值整定计算

只需输入发电机原始参数,保护装置程序内部自动进行保护定值的计算。

输入发电机直轴同步电抗 X_d 、发电机交轴同步电抗 X_q 、发电机组系统联系阻抗 x_s ,通过计算可以得到 $x_{d\Sigma}$ 、 $x_{q\Sigma}$ 、 α 。根据上文的计算公式,可以计算出动作特性曲线如图 1 所示,曲线外侧为导纳特性动作区。

3.2 新判据

为了防止失磁保护在其他正常工况下的误动,可在导纳判据的基础上增加无功反向判据 $B > 0$ 。

进一步地,为了防止在其他正常工况下失磁保护误动,如进相运行或发电机出口经过渡电阻相间短路等,在导纳平面还可以采用不经过原点的导纳线,其动作特性如图 3 中阴影部分所示,图 3 中导纳线的方程为:

$$G' + jB' = (G + jB - j/X_{zd})e^{j(90^\circ - \alpha)} \quad (10)$$

$$B' > 0$$

其中, α 为导纳线的角度定值,一般根据励磁调节器的低励极限角度或同步发电机稳定特性倾角选取,在 $60^\circ \sim 80^\circ$ 之间; $1/X_{zd}$ (即图 3 中的 Y_{zd}) 为导纳定值,一般按照 $1/X_d$ 来考虑。

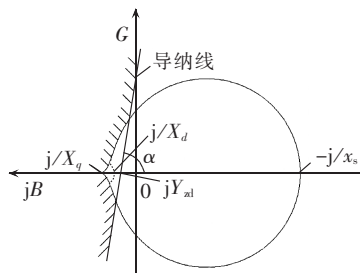


图 3 凸极发电机静态稳定边界导纳判据
Fig.3 Admittance criterion of static stability limit for salient pole generator

将凸极发电机静态稳定边界导纳动作判据反演至阻抗平面,可得到图 4,图中,阴影部分为动作区。

由图 4 可清楚地看出发生发电机失磁故障时机端测量阻抗的轨迹,增加电抗线判据可有效躲过进相运行等工况。

3.3 新判据的实现

根据发电机机端正序电压、正序电流计算导纳:

① 西门子公司. 多功能发电机保护 7UM62 用户手册(V4.6). 2005.

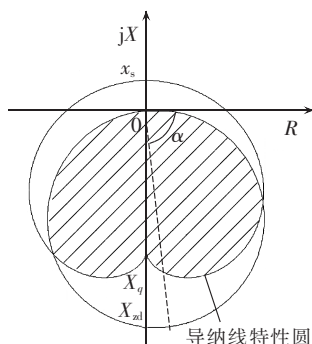


图 4 凸极发电机静态稳定边界导纳判据在阻抗平面的反演

Fig.4 Admittance criterion of static stability limit for salient pole generator, projected on impedance plane

$$Y_{op} = G_{op} + jB_{op} = \frac{I_T}{U_T} \quad (11)$$

其中, I_T 、 U_T 分别为机端电流和电压的正序分量。

由 G_{op} 、 B_{op} 可求出:

$$|Y_{op}| = \frac{I_T}{U_T}$$

$$\tan \varphi_{op} = B_{op} / G_{op} = \frac{U_C I_s - U_s I_C}{U_C I_C + U_s I_s}$$

其中, I_T 、 U_T 分别 I_T 、 U_T 的模值; U_C 和 U_s 分别为机端正序电压的实部和虚部; I_C 和 I_s 分别为机端正序电流的实部和虚部。

由 $\tan \varphi_{op}$ 或 φ_{op} 比对定值数据, 得到对应角度下的定值 $|Y_n|$, 如果 $|Y_{op}| > |Y_n|$, 则判为进入水轮发电机失磁保护静态稳定边界导纳动作区。

与无功反向判据或导纳线判据式(10)结合, 可判别是否进入动作区。

4 动模试验和现场验证

为验证本文所提的失磁保护导纳新判据, 在南瑞继保动模实验室进行了试验验证。试验结果表明, 本文所提判据在部分失磁、完全失磁及开路失磁故障情况下均能灵敏动作, 在机端两相短路故障、升压变高压侧单相接地及两相短路故障、系统振荡等情况下均可靠不动作。

某水电站机组轻载时, 发生完全失磁故障时的保护动作录波数据也验证了本判据的有效性, 其动作边界及导纳轨迹如图 5 所示。定值设置情况为: $X_d = 0.95$ p.u., $X_q = 0.67$ p.u., $x_s = 0.2$ p.u., $X'_d = 0.3$ p.u., 阻抗角为 75° , $Y_{zd} = 0.947$ p.u.。

图 5 中曲线 2 为水轮机静态稳定极限导纳特性圆; 曲线 1 为失磁过程导纳轨迹, 沿 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ (其中 a 点为 0 s 时刻, b 点为 0.943 s 时刻, c 点为 1.248 s 时刻, d 点为 4.516 s 时刻) 的顺序逐渐进入到导纳线外甚至是水轮机静态稳定极限圆外, 落入动作区。

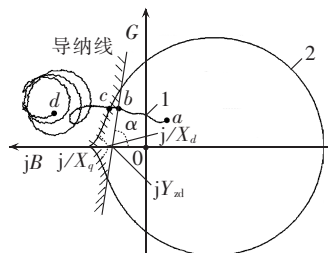


图 5 发生失磁故障的水轮机组的静态稳定极限导纳轨迹

Fig.5 Admittance trajectory of static stability limit of salient pole generator with LOE fault

5 结语

a. 凸极发电机失磁保护新判据直接采用水滴状曲线静态稳定边界导纳特性, 可以准确判别凸极发电机的失磁故障, 防止了导纳线、苹果圆阻抗判据等与静态稳定边界不匹配导致的不正确动作。

b. 凸极发电机失磁保护新判据整定方便, 只需输入 X_d 、 X_q 、 x_s 等参数, 保护装置自动计算出静态稳定边界水滴状曲线, 实现失磁保护导纳新判据。

c. 凸极发电机失磁保护导纳新判据与无功反向、电抗线等判据组合, 可进一步提高其可靠性。

d. 凸极发电机失磁保护导纳新判据在各种失磁故障情况下均能灵敏可靠动作, 具有良好的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 柳焕章. 发电机失磁保护的原理及整定计算[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 72-75.
LIU huanzhang. Principle of generator loss of excitation protection and its setting calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 72-75.
- [2] 卢敏. 水轮发电机临界失步问题的导纳分析及应用[J]. 东方电气评论, 2000, 14(1): 43-47.
LU Min. Admittance analysis & application for the critical step-out state of hydraulic generator[J]. Dongfang Dianqi Pinglun, 2000, 14(1): 43-47.
- [3] 于芳. 对发电机失磁保护的研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(3): 107-110.
YU Fang. The research for loss of excitation protection of generator[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006, 39(3): 107-110.
- [4] 史世文. 大机组继电保护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987: 45-49.
- [5] 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: 298-300.
- [6] 王正元, 兀鹏越, 吴加坤. 基于导纳特性的发电机失磁保护整定与调试[J]. 电气技术, 2014, 15(2): 64-67.
WANG Zhengyuan, WU Pengyue, WU Jiakun. Under-excitation protection value setting and checking based on admittance measurement principle[J]. Electrical Engineering, 2014, 15(2): 64-67.

作者简介:



沈全荣

沈全荣(1965—),男,江苏吴江人,研究员级高级工程师,硕士,从事电力主设备微机保护的研究、开发和管理工作的(E-mail:shenqr@nrec.com);

陈佳胜(1975—),男,湖北大冶人,高级工程师,硕士,从事电力主设备微机保护的研究和开发工作(E-mail:chenjs@nrec.com);

陈俊(1978—),男,江苏姜堰人,高级

工程师,硕士,从事电力主设备微机保护的研究、开发和管理工作的(E-mail:chenj@nrec.com);

郭自刚(1979—),男,湖北随州人,高级工程师,硕士,从事电力主设备微机保护方面的研究和开发工作(E-mail:guozg@nrec.com);

王光(1980—),男,内蒙古达拉特旗人,高级工程师,硕士,从事电力主设备微机保护的研究和开发工作(E-mail:wangg@nrec.com)。

LOE protection criterion based on admittance characteristic for hydraulic generator

SHEN Quanrong, CHEN Jiasheng, CHEN Jun, GUO Zhigang, WANG Guang
(Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Traditional LOE (Loss-Of-Excitation) protection for hydraulic generator commonly adopts the state stability limit criterion based on impedance principle or admittance principle. Though applied widely in practical engineering, there are still some problems. Without fitting, a teardrop-shaped admittance curve of LOE state stability limit is directly deduced based on the LOE process of salient-pole generator and a new LOE protection criterion based on admittance principle is proposed to reflect the actual state stability limit of hydraulic generator. Its setting is easy and its application effect is good.

Key words: excitation-loss; admittance criterion; salient-pole generator; static stability boundary; teardrop-shaped curve

(上接第 219 页 continued from page 219)

Type-matching of P-class CTs for differential protection of power transformer

HUANG Ting¹, ZHENG Tao¹, LU Geyi¹, LIU Lianguang¹, BAI Jialin², GAO Changpei²

(1. State Key Laboratory of New Energy Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Dispatching and Control Center of Guizhou Power Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: Aiming at the misoperation of power transformer differential protection due to the saturation difference among the CTs (Current Transformers) of different sides during out-zone faults, a type-matching scheme is proposed for the P-class CTs at different sides of power-transformer differential protection, which, based on the analysis of electric and magnetic circuits, considers that the CTs at different sides enter saturation simultaneously as a principle to eliminate the unbalanced current caused by the saturation difference among the CTs of different sides and thus avoid the misoperation of power transformer differential protection during out-zone faults. The influencing factors of CT type-matching are attained. Numerous PSCAD/EMTDC simulations are carried out to verify the effectiveness of the proposed scheme and suggestions about CT type selection for power transformer differential protection are given based on the research results.

Key words: current transformers; power transformers; differential protection; CT saturation; type-matching; unbalanced current