

发电机失步保护整定计算所用的等值联系电抗 X_{con} 研究

——与现行《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》商榷

张项安, 姚晴林, 陈海龙

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 现行《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》有关发电机失步保护整定计算中发电机机端与无限大系统间的等值联系电抗 X_{con} 的计算公式欠妥, 值得商榷。对此问题进行深入分析, 得出发电机失步保护整定计算中所用的 X_{con} 正确的计算方法。并在同一系统振荡工况下依照该计算方法所得的 X_{con} 值与依照《导则》的计算方法所得的 X_{con} 值进行对比分析, 分析结果表明:《导则》的整定计算方法极可能导致失步保护拒动, 而所提整定计算方法能确保失步保护可靠动作。

关键词: 失步保护; 发电机失步保护; 联系电抗; 系统电抗

Research on equivalent contact reactance X_{con} setting calculation for generator out-of-step protection ——discuss with Guide of Calculating Settings of Relay Protection for Large Generator and Transformer

ZHANG Xiang-an, YAO Qing-lin, CHEN Hai-long
(XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: The calculation formula of equivalent reactance X_{con} between generator and infinite system for generator out-of-step protection in the current " Guide of Calculating Settings of Relay Protection for Large Generator and Transformer " is improper, it is questionable. This paper has researched this problem deeply and obtained the correct method of the X_{con} setting calculation for generator out-of-step protection, and compared the X_{con} values calculated by the proposed calculation method and the " guidelines " calculation method in the same oscillation of the system condition, the results show that the " guidelines " setting calculation method may lead to the out-of-step protection maloperation, and the proposed setting calculation method can ensure the out-of-step protection reliable operation.

Key words: out-of-step protection; generator out-of-step protection; contact reactance; system reactance

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)07-0097-06

0 引言

现行《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》DL/T 684-2012(以下简称导则)有关发电机失步保护整定计算中所用的发电机机端与无限大系统间的等值联系电抗 X_{con} 的计算公式见导则的式(58)及附录F中的式(F1), 这两式分别计算出来的 X_{con} 值有差异, 互相矛盾, 而且这两式本身都欠妥, 值得商榷。

当前国内应用最广泛的微机型发电机失步保护主判据为凸透镜形阻抗继电器, 它的基本原理最早来自上世纪八十年代阿城继电器厂引进 BBC 公司集成电路型发电机变压器成套保护装置中失步保护的原理, 但 BBC 公司移交的失步保护技术资料中未

见该失步保护安装在发电机机端时的 X_{con} 值的计算方法。多年来国内发电机失步保护如何整定 X_{con} 值处于混乱状态, 莫衷一是。该问题的商榷研究具有学术及应用价值。

1 《导则》中发电机失步保护 X_{con} 的整定计算公式并论述该公式的欠妥之处

1.1 导则的式(58)为

$$X_{\text{con}} = X_T + X_s \quad (\text{导则式(58)})$$

式中: X_s 为最大运行方式下系统电抗归算到本发电厂主变压器高压侧的值, 此值不包括本发电厂机组的电抗; X_T 为主变压器电抗。显然导则的式(58)

只适用于发电厂的主接线只有一台发电机变压器组的场合，在现实中这种场合极少存在或几乎不存在；也就是对主接线有 2 台或 2 台以上发电机变压器组并联运行的广泛发电厂而言，导则式 (58) 是不适用的。导则式 (58) 欠妥。

1.2 导则的附录 F 中的式 (F1) 为

$$X_{con} = X_T + \frac{X_s(X_g + X_T)}{X_s(n-1) + X_g + X_T} \quad (\text{导则式 (F1)})$$

这是导则设发电厂的主接线有 n 台参数相同的发电机变压器组在主变压器高压侧并联运行，发电机电抗均为 X_g ， X_T 、 X_s 意义同前。

导则式 (F1) 是把该发电厂的某一台机组 (如 1 号机) 作为被整定的机组，从而将本厂的其他 $(n-1)$ 台发电机变压器组的电抗与 X_s 并联，而成为单机 (1 号机) 对无限大系统，见导则中附录 F 的图 F1 所示的等值电路。

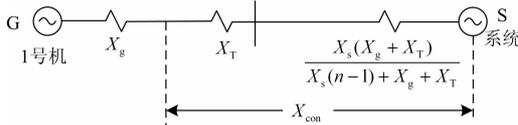


图 F1 《导则》中附录 F 的图 F1

Fig. F1 Figure F1 in "guidelines" Appendix F

导则的附录 F 明确写出：发电机的失磁保护及失步保护整定计算中所用的 X_{con} 值都应按式 (F1) 进行计算。这句话欠妥，本文作者认为：

按导则的式 (F1) 来计算发电机失磁保护整定计算中所用的 X_{con} 值是正确的。因为某台发电机发生失磁失步故障时，本厂相邻的发电机由于都装有自动调节励磁装置，它们不会也失步，而是会自动增加无功输出与系统一起供应失磁机的无功吸入，所以将本厂的除一台失磁机组之外的其他完好机组都并入系统作为系统的一部分是合理的，成为单机低励磁失步对无限大系统的低励磁振荡，以此种工况来整定发电机失磁保护的 X_{con} 是正确的。

但是，导则的式 (F1) 不能作为发电机失步保护整定计算中所用的 X_{con} 值的计算公式，其理由是：发电机失步保护是保护发电机测量到的系统大干扰 (如短路或短路切除或重合闸又跳闸等) 引起的振荡，这种振荡的主要特点是在大干扰发生数秒 (如 4 s) 之后功率角 δ 拉大而产生的，发电机励磁不太低，不会低于静稳边界的励磁，多数情况是发电机电势 E_g 等于系统电势 E_s ，甚至是 $E_g > E_s$ ，而 E_g 稍低于 E_s 的状态也间或有，其滑差率 s 远小于低励失步引起振荡的 s ，而且其 s 较平稳趋近于常数，

在 $R-X$ 坐标平面上机端测量阻抗 Z_j 随时间变化的轨迹为直线^[1] ($E_g = E_s$) 或圆周 ($E_g > E_s$)，这种振荡几乎都是一个发电厂 (或一个区域电网) 与系统之间的振荡，不可能是发电厂的某一个单台发电机与系统之间的振荡。例如系统中某条线路短路或短路切除又重合闸引起某电厂作为一个整体与系统间发生振荡或引起一个区域电网与系统间发生振荡；又例如发电厂某台发变组内部短路，则其纵差保护动作跳开该台发变组，从而引起本厂其余发变组并联一起作为一个等值发变组与系统间振荡；至于一台发电机由于加大调速汽门提高有功输出而未及时加大励磁致使发电机静稳破坏而发生这台机组与系统之间振荡，这实质上是发电机低励磁失步故障引起的低励磁振荡，这种故障是失磁保护应担负的典型保护任务之一，应由发生低励磁失步故障的发电机的失磁保护动作^[2-3]，跳开故障机组，这不是发电机失步保护应担当的保护任务。因此，导则图 F1 所示将一个发电厂的 $(n-1)$ 台机组并入系统而成为单机对无限大系统之间振荡的工况不能作为计算发电机失步保护用的 X_{con} 值的工况，也就是发电机失步保护用的 X_{con} 值不能按照导则式 (F1) 来计算。

按照导则的式 (F1) 或导则的式 (58) 计算出的 X_{con} 值用于发电机失步保护的整定计算会给失步保护的动作为造成异常，大幅度偏离失步保护理论设计的动作特性，详见本文第 3 节的分析。

2 发电机失步保护整定计算中所用的 X_{con} 值研究

为清晰论述 X_{con} 起见，需首先简要说明透镜阻抗型发电机失步保护的基本原理，见图 1。

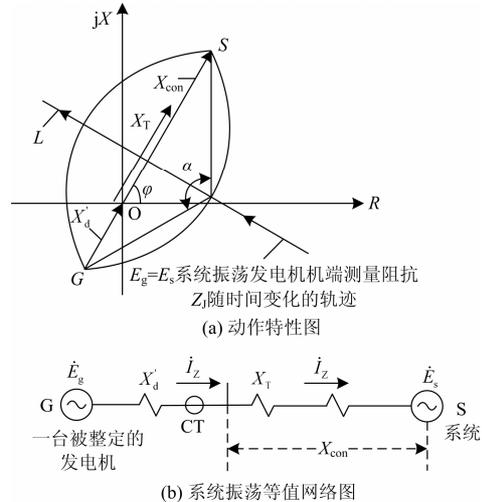


图 1 发电机透镜阻抗型失步保护主判据

Fig. 1 Main criterion of lens impedance type out-of-step protection for generator

图 1 中失步保护装在发电机机端, 坐标原点 O 为机端, 系统振荡时发电机电抗为 X'_d , 机端与系统间的等值联系电抗 X_{con} 包含主变压器电抗 X_T 之外, 尚包含一个与系统电抗 X_s 有函数关系的电抗, 此电抗正是本文研究的重点。图中 $\overline{OS} = X_{\text{con}}$, $\overline{GO} = X'_d$, 阻抗角 $\varphi = 80^\circ \sim 85^\circ$ 。 $E_g = E_s$ 时系统振荡机端测量阻抗 Z_J 随时间变化的轨迹直线 L 为透镜 \overline{GS} 线的中垂线, 即直线 L 从透镜的最宽处通过, 当穿过透镜左右两半的历时各自均大于 25 ms (即合起来大于 50 ms) 时, 就认定系统振荡滑极一次, 滑极次数大于定值时, 失步保护出口动作。 L 直线与 GS 线的交点为系统振荡中心。透镜边界线为两个圆周相交而成, 圆周角 α 称为内角 (实质上 α 是 L 直线与圆周相交时 \dot{E}_g 与 \dot{E}_s 间的功率角 δ , 即功率角的整定值)。 α 的整定值按机端最小负荷阻抗一定应落于透镜边界之外的原则来整定, α 按式(1)^[4-6] 整定。

$$\alpha = 180^\circ - 2\arctg \frac{1.54R_{L,\min}}{X'_d + X_{\text{con}}} \quad (1)$$

式中, $R_{L,\min}$ 为机端最小负荷阻抗的电阻分量。

对发电机失步保护而言, 最典型 (或多数) 电力系统振荡是高压输电线路短路或其他大干扰引起某个发电厂作为一个整体 (多台发变组并联成一个等值发变组) 与无限大系统间振荡。因此, 应依据这种振荡工况来整定发电机失步保护的 X_{con} , 见图 2、图 3。

强调指出, 发电机失步保护测量阻抗 Z_J 中的测量电流是取自机端电流互感器 CT, 也就是上述发电机失步保护的基本原理是建立在 “系统振荡时失步保护的测量电流与流过 X'_d 、 X_T 、 X_{con} 的电流是同一个振荡电流 \dot{I}_Z (见图 1(b))” 基础之上, 只有当这个基础条件满足时才能达到图 1(a) 所示的动作特性。

2.1 同一个发电厂并联的多台发电机变压器组的参数相同

某发电厂有参数相同的三台发电机变压器组在高压母线上并联运行成为一个等值发电机变压器组与系统间发生振荡, 振荡电流实际流动电路见图 2(a), 其等值电路为图 2(b)。所谓等值电路, 是这两个电路中的 \dot{E}_g 、 \dot{U}_g 、 \dot{U}_T 、 \dot{E}_s 各自相应地相等。图 2(b) 中失步保护的测量电流与流过 X'_d 、 X_T 、 X_{con} 的电流相等, 都为同一个电流 “ $\frac{1}{3}\dot{I}_Z$ ”, 符合上述失

步保护动作原理建立的先决条件, 所以应按照图 2(b) 求出发电机失步保护整定计算中所用的等值联系电抗 X_{con} 的值, 为

$$X_{\text{con}} = X_T + 3X_s \quad (2)$$

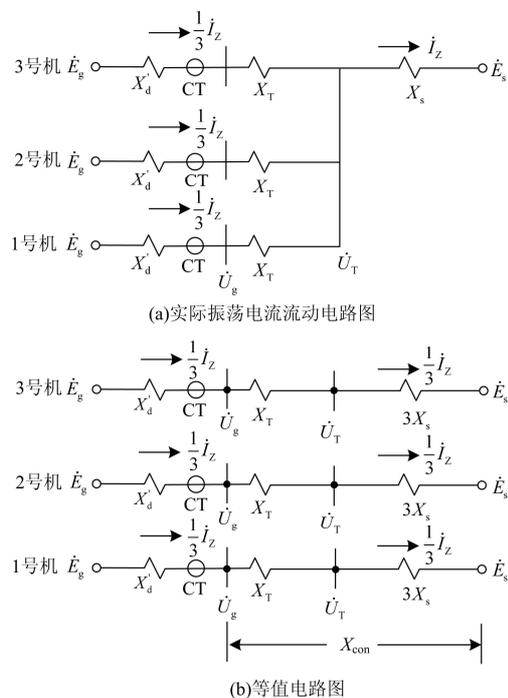


图 2 三台相同参数的发电机变压器组并联的发电厂与系统间的振荡

Fig. 2 Oscillation between system and a power plant containing parallel three generator-transformer sets, which have same parameters

从以下两个方面的物理意义上对式 (2) 作深入分析:

(1) 见图 2(a), 系统振荡时每台发电机 (如 1 号机) 的测量电流 \dot{I}_J 取自机端 CT, $\dot{I}_J = \frac{1}{3}\dot{I}_Z$, 可见 \dot{I}_J 正确反映了流过 X'_d 、 X_T 的实际电流 “ $\frac{1}{3}\dot{I}_Z$ ”, 但是 \dot{I}_J 没有正确反映流过 X_s 的实际电流 \dot{I}_Z 。对于 X_s 而言, \dot{I}_J 值缩小至 X_s 的实际电流的 $\frac{1}{3}$, 则保护的测量阻抗 Z_J 必会错误地增大, Z_J 的振荡轨迹直线 L 必会错误地抬高; 因此, 为了保证失步保护原设计的正确动作特性, 必须把透镜动作特性的最高点 (图 1(a) 的 S 点) 也相应地抬高, 即把 X_s 的整定

值相应地增大至 3 倍成为“ $3X_s$ ”，使透镜的中轴线 \overline{GS} 的长度相应增长，这样才能使抬高后的 Z_j 振荡轨迹直线 L 仍会如动作原理要求的那样从 \overline{GS} 的中点垂直穿过，即仍能从透镜的最宽处穿过。

(2) 见图 2(b)，流过 X'_d 、 X_T 、 $3X_s$ 的电流相等，都等于保护的测量电流 $\dot{I}_j = \frac{1}{3}\dot{I}_Z$ 。只有如此处理“ $3X_s$ ”，才能保证系统振荡时图 2(b) 中的 $(\dot{U}_T - \dot{E}_s)$ 的压降等于图 2(a) 中的 $(\dot{U}_T - \dot{E}_s)$ 的压降，才能保证这两图中的 \dot{E}_g 、 \dot{U}_g 、 \dot{U}_T 、 \dot{E}_s 值各自相应地相等，图 2(b) 才是实际电路图 2(a) 的等值电路。

同理，若发电厂有 n 台参数相同的发电机变压器组并联，则每台发电机失步保护整定计算中所用的联系电抗 X_{con} 应采用的通式为

$$X_{con} = X_T + nX_s \quad (3)$$

式中： X_T 是一台主变压器电抗； X_s 是除本发电厂的发电机变压器组之外，系统归算到本发电厂高压母线的系统电抗。

2.2 同一个发电厂并联的多台发电机变压器组的参数不同

见图 3，一个发电厂高压母线上并联 n 台参数不同的发电机变压器组作为一个整体与系统间发生振荡，总振荡电流 \dot{I}_Z 为

$$\dot{I}_Z = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dots + \dot{I}_n \quad (4)$$

各台发电机变压器组电抗并联后的电抗 X_p 为 $X_p = (X'_{d1} + X_{T1}) \parallel (X'_{d2} + X_{T2}) \parallel \dots \parallel (X'_{dn} + X_{Tn})$ (5)

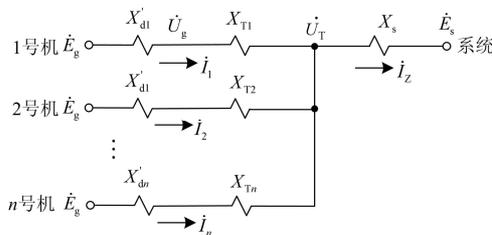


图 3 多台参数不同的发电机变压器组并联的发电厂与系统振荡网络图

Fig. 3 Network diagram of oscillation between system and a power plant containing much parallel generator-transformer sets, which have different parameters

认为各发电机变压器组的阻抗角相等，则流过各发电机变压器组的振荡电流 I_1 、 I_2 、 \dots 、 I_n 的幅值大小按电抗反比分配，得各发电机变压器组的分支系数 K_{fz} 为

$$\begin{cases} K_{fz1} = \frac{I_Z}{I_1} = \frac{X'_{d1} + X_{T1}}{X_p} \\ K_{fz2} = \frac{I_Z}{I_2} = \frac{X'_{d2} + X_{T2}}{X_p} \\ \vdots \\ K_{fzn} = \frac{I_Z}{I_n} = \frac{X'_{dn} + X_{Tn}}{X_p} \end{cases} \quad (6)$$

与对式 (2) 的分析同理，得出各台发电机失步保护整定计算中所用的机端至无限大系统间的等值联系电抗 X_{con} 为

$$\begin{cases} X_{con1} = X_{T1} + K_{fz1}X_s \\ X_{con2} = X_{T2} + K_{fz2}X_s \\ \vdots \\ X_{conn} = X_{Tn} + K_{fzn}X_s \end{cases} \quad (7)$$

式 (7) 为一切发电机失步保护整定计算所用 X_{con} 值计算的通式，当一个发电厂的 n 台发电机变压器组的电抗参数相同时，式 (7) 中各台发变组的分支系数 K_{fz} 相同且 $K_{fz} = n$ ，式 (7) 就成为式 (3)，可见式 (3) 只是式 (7) 通式的一个特例。

式 (7)、式 (3) 中的分支系数在物理意义上类同于距离保护整定计算中所用的分支系数。距离保护的分支系数有助增型 (分支系数大于 1) 与外汲型 (分支系数小于 1)，而发电机失步保护 X_{con} 的分支系数恒大于 1，最小为 1。

式 (7)、式 (3) 中的 X_s 、 n 按系统最大运行方式下的值整定。最大运行方式时的 X_s 、 n 值以 $X_{s.min}$ 、 n_{max} 表示；最小运行方式时 X_s 、 n 值以 $X_{s.max}$ 、 n_{min} 表示。在系统最大运行方式下，发电厂作为一个整体与系统间发生 $E_g = E_s$ 振荡时，实际测量的 $X_{con} = X_T + n_{max}X_{s.min}$ 与整定值相等，机端测量阻抗 Z_j 振荡轨迹直线为图 1 (a) 中的 \overline{GS} 线的中垂线，即 Z_j 振荡轨迹从透镜的最宽处穿过，失步保护可靠动作。在系统最小运行方式下发电厂作为一个整体与系统间发生 $E_g = E_s$ 振荡时，实际测量的 $X_{con} = X_T + n_{min}X_{s.max}$ 可能大于也可能小于整定

$X_{con} = X_T + X_s$ 值又不变, $R_{L.min}$ 值自然也不变, 见式(1)及式(8), 这实质上是运行人员强制性地大幅度地改变了可靠系数, 将可靠系数由常规的 0.77 剧烈地降低到很小的值(如 0.3 以下)才能使 α 由 50° 增大至 120° 。这样导致透镜的 \overline{NC} 值太小(见式(8)), 透镜的宽度更窄, 结果是透镜的纵轴长度 \overline{GS} 很短(因 $X_{con} = X_T + X_s$ 值太小), 横轴也很短, 系统振荡时发电机失步保护拒动的可能性更大, 能保护的系统振荡滑差频率 f_s 的范围更小, 能保护系统振荡最高滑差频率 $f_{s,max}$ 值更低。

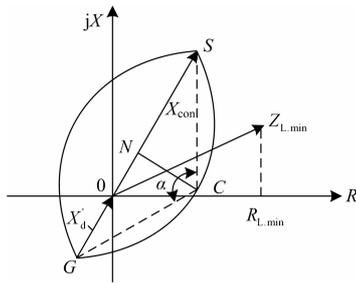


图 5 整定值 α 与 X_{con} 、 \overline{NC} 、 $R_{L.min}$ 的关系分析图

Fig. 5 Relationship analysis chart of the setting value of α and X_{con} 、 \overline{NC} 、 $R_{L.min}$

综合上述,《导则》的式(58)及式(F1)欠妥,值得商榷。

参考文献

[1] 董希建. 基于相位角原理的失步振荡解列判据机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 1-6.
DONG Xi-jian. Research on out-of-step oscillation criterion mechanism based on principle of phase angle[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 1-6.

[2] 陆秋瑜. 考虑机网协调的新型发电机失磁保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 1-6.
LU Qiu-yu. New loss of excitation protection scheme

based on coordinated optimization between generator and grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 1-6.

[3] 隋佳音. 新型发电机失磁保护加速判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 69-73.
SUI Jia-yin. A novel accelerated criterion for loss of field protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 69-73.

[4] BBC 公司. 发电机变压器集成电路型保护装置技术资料[S]. 1987.
BBC Company. Technology data of generator-transformer protection device of integrated circuit type[S]. 1987.

[5] 国家能源局. DL/T 684-2012 大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S]. 2012.
The National Energy Bureau. DL/T 684-2012 guide of calculating settings of relay protection for large generator and transformer[S]. 2012.

[6] 许继电气股份有限公司. WFB-800A 微机型发电机变压器组成套保护装置技术说明书[S]. 2006.
XJ Electric Co., Ltd. Technical manual of WFB-800A generator-transformer group protection equipment based on microprocessor[S]. 2006.

收稿日期: 2013-12-26; 修回日期: 2013-03-04

作者简介:

张项安(1968-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化; E-mail: 124951470@qq.com

姚晴林(1931-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护;

陈海龙(1975-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。