

工频变化量距离保护测试及应用

鲁 炜¹, 靳 希²

(1.上海电力公司 超高压输变电公司,上海 200063;
2.上海电力学院 电力与自动化工程学院,上海 200090)

摘要: 对工频变化量距离保护的校验方法进行了研究,《电力系统继电保护规定汇编》中的校验方法将工频变化量距离元件视为一个过电压继电器,而《电力系统继电保护实用技术问答》中的计算公式则是基于传统距离继电器的概念,比较了 2 种方法的优点及不足。国产继电保护测试仪一般都有针对工频变化量的专用测试菜单,而进口仪器则需预先计算和设置。结合上海电网具有短路容量大、电气距离短的特点,提出了使用进口仪器测试工频变化量距离保护的具体方法。最后,对工频变化量距离保护的开放条件的必要性作了分析。

关键词: 工频变化量距离保护; 规程; 校验方法; 开放条件

中图分类号: TM 773 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)12-0017-04

RCS-900 和 LFP-900 系列的线路保护在上海电网应用很多,一般配置有接地距离、相间距离、零序过流和工频变化量等保护元件,对于前 3 种继电器的原理,在经典电力系统教材中都有讲述,因此比较容易理解。

工频变化量是 LFP、RCS 系列保护中的关键技术,是它动作最快速的元件,国内于 1986 年提出了工频变化量的理论。工频变化量理论包括 2 部分:一部分是工频变化量距离元件,另一部分是工频变化量方向元件。具体的理论推演和算法优点本文不再赘述,可以参考文献[1-2]。本文主要介绍笔者对工

频变化量距离保护校验的几点认识。

1 对继电器的理解

工频变化量距离继电器的动作方程^[3]为

$$|\Delta U_{OP}| > U_Z \tag{1}$$

式中 U_{OP} 是工作电压, Δ 是取故障前后的变化量; U_Z 是动作门槛,取故障前正常运行工作电压的记忆值。

工频变化量距离元件共有 6 个,即 3 个相间距离元件和 3 个相距离元件,它们工作电压分别描述。

a. 相间距离元件工作电压为

$$\Delta U_{OP\phi\phi} = \Delta U_{\phi\phi} - \Delta I_{\phi\phi} Z_{ZD} \tag{2}$$

式中 $\phi\phi$ 为 ab、bc、ca; $\Delta U_{\phi\phi}$ 、 $\Delta I_{\phi\phi}$ 分别为继电器安装处的电压及电流的变化量; Z_{ZD} 为工频变化量

收稿日期:2006-02-28;修回日期:2006-08-04
基金项目:上海市重大科技攻关项目(041612012);上海市重点学科建设项目(P1301)

距离元件的整定阻抗。

b. 相距离元件工作电压为

$$\Delta U_{\text{OP}\phi} = \Delta U_{\phi} - (\Delta I_{\phi} + K \Delta 3 I_0) Z_{\text{ZD}} \quad (3)$$

式中 ϕ 为 a、b、c; K 为零序补偿系数; 其余说明与式(2)相同。

下面几个概念搞清楚以后有助于对其原理的理解。

a. 所谓工频变化量就是常说的突变量, 即系统故障时电气量和正常运行时电气量的差值。例如, 正常时保护检测到电压 58 V, 电流 3 A; 故障时检测到电压为 28 V, 电流为 25 A。则电压变化量(以 ΔU 表示)为 30 V, 电流变化量(以 ΔI 表示)为 22 A。

b. 工频变化量距离继电器测量工作电压的变化幅值, 其工作原理实质上是一个简单的过压继电器, 这与常规的距离继电器有本质区别。并且越靠近出口故障, 测量到电压变化量越大, 动作越快。

c. 继电器检测到的工作电压变化量由 2 部分组成: 一部分是电压变化量 ΔU , 另一部分是电流变化量 ΔI 与整定阻抗 Z_{ZD} 的乘积。此两者之和的绝对值大于记忆的正常电压, 保护就动作。

2 工频变化量距离保护的校验方法^[4-10]

有关工频变化量距离保护定值的校验方法, 国调中心主编的《电力系统继电保护规定汇编》(简称《规程》)^[1]和《电力系统继电保护实用技术问答》(简称《问答》)^[2]中介绍了 2 种不同的试验方法, 有着截然不同的公式, 书中对公式的来历没有说明。现对 2 种试验方法进行分析。

2.1 《规程》中的方法

投入主保护或零序保护功能投入压板, 分别模拟 A 相、B 相、C 相单相接地瞬时故障和 AB、BC、CA 相间瞬时故障。模拟故障电流固定(其数值应使模拟故障电压在 $0 \sim U_N$ 范围内), 模拟故障前电压为额定电压, 模拟故障时间为 100~150 ms, 故障电压为

模拟单相接地故障时,

$$U = (1+k)IZ_{\text{ZD}} + (1-1.05m)U_N$$

模拟相间故障时,

$$U = 2IZ_{\text{ZD}} + (1-1.05m)\sqrt{3}U_N$$

式中 m 为系数, 其值分别为 0.9、1.1 及 1.2。

工频变化量距离保护在 $m=1.1$ 时, 应可靠动作; 在 $m=0.9$ 时, 应可靠不动作; 在 $m=1.2$ 时, 测量工频变化量保护动作时间。

以上摘自《规程》中一段。规程中对公式由来没有推导, 下面进行分析。

试验时, 设故障前为空载、额定电压 U_N , 假设故障后电压为 U 、电流为 I , 则式(1)变为

$$|\Delta U_{\text{OP}}| = |U - U_N| + IZ_{\text{ZD}} = U_N - U + IZ_{\text{ZD}} \quad (4)$$

继电器的动作方程为

$$U_N - U + IZ_{\text{ZD}} > 105\%U_N \quad (5)$$

考虑 5% 的互感器暂态误差影响, 式(1)中门槛电压应为 $105\%U_N$ 。根据《继电保护及电网安全自

动装置检验条例》中要求: “检查当动作量为整定动作值 1.05~1.1 倍(反映过定值动作条件)或 0.9~0.95 倍(反映低定值动作条件)时继电器动作是否可靠”, 因此《规程》方法就按门槛电压的 10% 偏差得出校验动作的依据, 则式(5)变化为

$$U_N - U + IZ_{\text{ZD}} = m \times 105\%U_N \quad (6)$$

$m=0.9$ 时保护可靠不动作, $m=1.1$ 时保护可靠动作。把式(6)进行移项就可以得到《规程》中的公式。有一点需要指出: 此公式是依据门槛电压的 10% 偏差得来的, 下面推导其对应的保护范围。

以单相接地故障为例, 设故障点到保护安装处的阻抗为 Z , 则下面公式成立:

$$(1+k)IZ_{\text{ZD}} + (1-1.05m)U_N = I(1+k)Z$$

化简为

$$Z = Z_{\text{ZD}} + \frac{(1-1.05m)U_N}{(1+k)I} \quad (7)$$

试算一组数据, 设某线全长的阻抗为 $4\ \Omega$, 工频变化量阻抗按保护全长 85% 整定, $Z_{\text{ZD}} = 0.85 \times 4\ \Omega = 3.4\ \Omega$, $k=0.5$, $U_N=57.7\ \text{V}$, 短路电流 $I=5\ \text{A}$ 。

代入式(7), $m=0.9$, 得 $Z=3.823\ \Omega$, 是线路全长的 95.6%; $m=1.1$, 得 $Z=2.208\ \Omega$, 是线路全长的 55.2%。

若将短路电流改为 $I=2\ \text{A}$, $m=0.9$, 得 $Z=4.458\ \Omega$, 保护全长的 111.4%; $m=1.1$, 得 $Z=0.419\ \Omega$, 保护全长的 10.5%。

可见 $m=0.9$ 或 1.1 对应的保护范围随短路电流变化很大。上海电网的网架紧凑, Z_{ZD} 较小, 这种保护范围的变化将更明显, 无法可靠校验在整定阻抗附近的动作行为, 与校验传统距离保护时“整定值 $\pm 10\%$ ”概念完全不同。

2.2 《问答》中的方法

下面引用《问答》中的校验方法。

LFP-901A 型保护中工频变化量阻抗元件的定值应按以下方法对其进行校验。

a. 正方向单相接地时: 模拟故障电流 $I=I_N$, 相角为灵敏角; 模拟故障电压 $U=m(1+k)IZ_{\text{ZD}}-3$ 。 $m=0.9$ 时, 阻抗元件动作; $m=1.1$ 时, 阻抗元件不动作。

b. 正方向相间故障时: 模拟故障电流 $I=I_N$, 相角为灵敏角; 模拟故障电压 $U=2mIZ_{\text{ZD}}-3$ 。 $m=0.9$ 时, 阻抗元件动作; $m=1.1$ 时, 阻抗元件不动作。

现分析《问答》中的方法: 对式(5)化简, 得 $U_N - U + IZ_{\text{ZD}} > 105\%U_N$, 得到动作条件 $U < IZ_{\text{ZD}} - 5\%U_N$ 。

根据《线路微机保护校验规程》, 应校验保护定值在最大 10% 偏差时保护的動作情况, 故有 $U=I \times (mZ_{\text{ZD}}) - 5\%U_N$ 。

$m=0.9$ 时保护应可靠动作, $m=1.1$ 时保护应可靠不动作(注意: 此时 m 的含义也与《规程》方法完全不同, 规程中是 $m=0.9$ 可靠不动作, $m=1.1$ 可靠动作)。单相接地故障时:

$$U = m(1+k)Z_{\text{ZD}} - 5\% \times 100 / \sqrt{3} = m(1+k)IZ_{\text{ZD}} - 3$$

相间故障时(式(5)中的 U_N 指的是相间额定电压, 应为 100 V):

$$U = 2mIZ_{ZD} - 5\% \times 100 = 2mIZ_{ZD} - 5$$

可见《问答》中关于相间短路故障的公式是错误的。但对比《规程》中的校验方法,《问答》的方法可以校验出继电器在整定阻抗附近的动作行为。

2.3 现场校验方法

目前,在上海超高压输变电公司使用的继电保护试验仪中,国产试验仪 JJC、PW 30、HD 6940 都有专门的工频变化量校验菜单,只需填好整定阻抗、故障类型、短路电流和系数 m ,就可以校验及测时。其工频变化量校验输出的算法就是依据《规程》中的方法。

而在进口试验仪器(例如 FREJA)中,就没有工频变化量距离保护的概念,可以自己设置状态。状态 1 是正常态,电压 57.7 V,三相平衡,电流为 0(注意:状态 1 的时间要足够长,例如 10 s,使保护进入正常状态)。状态 2 是故障态,保持电压不变,加入故障电流,以 A 相接地故障为例,假设工频变化量距离整定为 Z_{ZD} ,则在 $0.9Z_{ZD}$ 处故障应可靠动作,在 $1.1Z_{ZD}$ 处故障应可靠不动作:

$0.9Z_{ZD}$ 时, $I_A = \frac{57.7}{0.9Z_{ZD}(1+k)}$, 电压、电流错开一个灵敏角,工频变化量元件应可靠动作;

$1.1Z_{ZD}$ 时, $I_A = \frac{57.7}{1.1Z_{ZD}(1+k)}$, 电压、电流错开灵敏角,工频变化量元件应可靠不动作。

这样的理论分析看似合理,但在实际校验还是会出现问题,其原因在于上海电网的特点:电网结构紧凑,电缆线路较多。例如,源深站的源东 2171、2172, $Z_{ZD} = 2 \Omega$, $k = 0$, 在 $0.9Z_{ZD}$ 时, $I_A = 32.06 \text{ A}$; 而 FREJA 的单相最大输出就 15 A, 要求三相合一相输出,给校验带来麻烦。再例如,杨思站的思新 2116、2117, $Z_{ZD} = 0.14 \Omega$, $k = 0.38$, 在 $0.9Z_{ZD}$ 时, $I_A = 331.8 \text{ A}$, 即便是三相合一也无法满足。

若使用《问答》中的方法,以思新 2116 为例,设短路电流为 $I_A = 15 \text{ A}$, 在 $0.9Z_{ZD}$ 时, $U_A = m(1+k)I_A Z_{ZD} - 3 = 0.9 \times 1.38 \times 15 \times 0.14 - 3 = -0.3918 \text{ (V)}$ 。需加入一个负的交流电压,这显然与实际不符,原因在于短线路的 Z_{ZD} 很小。此时应适当加大故障电流,设短路电流 $I_A = 20 \text{ A}$, 在 $0.9Z_{ZD}$ 时, $U_A = m(1+k)I_A Z_{ZD} - 3 = 0.9 \times 1.38 \times 20 \times 0.14 - 3 = 0.478 \text{ (V)}$ 。虽然电流输出还是得两相合一,但是已经可以完成校验任务。实际上短线发生故障时流过的短路电流很大,所以试验时应该适当加大通入的故障电流。

3 工频变化量的开放条件——全阻抗距离元件

根据保护说明书介绍,考虑到长距离输电线路在空载运行下,若相邻线路近端故障(或母线故障)后被切除,则线路的末端电压将从无电压跳变为线路电容充电电压,工频变化量距离元件有可能动作。以图 1 为例,保护安装在开关 QF_1 处,下一级线路近端故障时 QF_3 跳开,保护会感受到一个电压波动,可能会使 $|\Delta U_{OP}| > U_Z$, 导致保护误动。因此,有必要引入一

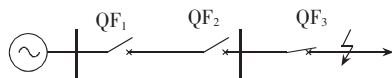


图 1 切除线路末端故障示意图

Fig.1 Separation of fault at line end

个全阻抗元件 Z_{Zdw} , 作为工频变化量的开放条件,其判断为

$$|U| < |IZ_{Zdw}|$$

式中 U 、 I 为故障相的电压、电流的半波积分,全阻抗定值固定为 $Z_{Zdw} = U_N / (1.5 I_N)$ 。

笔者认为加“全阻抗开放条件”不止说明书上所写的理由,引起工作电压波动的不仅是下一级线路近端故障,正常的切除空载线路的操作过电压也可能导致误动(尤其是长线路),笔者曾经仿真过的山西阳城到江苏徐州的线路操作过电压,在无避雷器限制时,操作过电压在 $(1.8 \sim 5)U_N$ (视合闸角度和电弧重燃次数而定),如果没有全阻抗元件的限制,操作时电压波动也可能导致工频变化量距离元件误动。

反映故障附加分量的保护可以做到超高速,但是有时也会反应过于灵敏,会因为操作和区外故障而误动,例如瑞典 ASEA 公司的 RALDA 行波保护(曾用于国内最早的 500 kV 平武线,保护已停用)和原瑞士 BBC 公司的 LR-91 超高速方向保护(1986 年后国内曾有多工程引进,都已停用),在电科院的动模试验和运行中都多次误动。

LFP-900 保护由 3 个 CPU 构成。

a. CPU₃ 是通信管理机,负责 3 个 CPU 之间的通信、人机接口和故障测距,它的故障测距数据来自距离保护 CPU₂,故障测距为离线运算,选择精度高的滤波算法(精度高势必速度慢,可用于事后分析的测距,却无法用于快速动作的保护)。

b. CPU₂ 内有后备距离保护和重合闸。作为后备保护,强调的是准确性;采样率是 12 点/周期,采样速度不高,是为了保证在采样周期内完成计算;采用的算法是全波傅氏算法,滤波效果好、测量准确;要求保护段不得超越。

c. CPU₁ 完成工频变化量方向以及零序功率方向的纵联,工频变化量距离和零序 II 段、III 段保护。作为主保护,强调快速跳闸,采样率是 20 点/周期,是为了保证快速跳闸时有较多的计算次数;使用的是半波积分算法,算法简单、速度很快;要求是严重故障时超高速动作。

这里简单介绍一下工频变化量保护所在 CPU₁ 使用的半波积分算法。

假设函数 $a(t) = A_m \sin \omega t$, 对它的积分半个周期 $0 \sim T/2$, 其面积为

$$S = \int_0^{T/2} A_m \sin \omega t dt = \frac{-A_m}{\omega} \cos \omega t \Big|_0^{T/2} = \frac{2}{\omega} A_m = \frac{T}{\pi} A_m$$

即正弦量的半波绝对值积分正比于幅值 A_m , 半波积分算法用累加法计算,运算简单快速,便于在单片机上实现。但须注意:该算法有前提,即被采样波形是纯正弦特性。但是,在电力系统故障发生的初

始阶段,电压、电流波形中含有丰富的非周期衰减分量;而且电压等级越高,系统的时间常数越大,衰减就越慢,典型的 220 kV 系统的时间常数为 40~60 ms,500 kV 系统为 100 ms,若有类似石洞口二厂的 60×10^4 kW 机组,时间常数将长达 260 ms。然而,根据厂家提供的数据,工频变化量距离元件在近端故障情况下的动作时间为 3~10 ms。如此短的时间内,电压、电流波形都是非正弦的,不但有非周期分量,还有高频分量,绝非“工频”。因此,用半波积分得到的电压、电流和真正波形中 50 Hz 分量是有区别的,单纯以工频变化量作为出口依据,难免误动。

同样在电气操作时,线路上也会有操作暂态电压波动。因此,为提高工频变化量距离的安全性,很有必要增加全阻抗元件作为开放条件。在 LFP 系列中,901A 是使用全阻抗元件作为开放条件(定值固定为 $Z_{\text{all}} = U_N / (1.5I_N)$,不可整定),902A 和 941B 是四边形距离元件作为开放条件(四边形可以通过 Z_{all} 和 R_{all} 整定);近年来,厂家对硬件平台做了升级,推出了 RCS-900 系列,新产品中工频变化量的开放元件统一为全阻抗元件。

4 结论

工频变化量距离保护原理新颖,构成简单,便于在微机中实现,而且动作速度快,是我国继电保护工作者智慧的结晶,但是在传统的继电保护教材中没有理论讲述,厂家的说明书很多地方又不详细,因此在校验时难免会有困惑。只要理解了公式中每个参数的来历和含义,就能很好地运用它,这样才能保证校验质量,把现场检修工作做好。

参考文献:

- [1] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护实用技术问答[M]. 北京:中国电力出版社,2000.
- [2] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护规定汇编[S]. 北京:中国电力出版社,2000.
- [3] 陈德树. 计算机继电保护技术[M]. 北京:中国电力出版社,1997.

- [4] 韩笑,赵景峰. 电网微机保护测试技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [5] 靳希,鲁炜. Lagrange 方程应用于电系统及机电系统运行分析[J]. 上海电力学院学报,2003,19(4):1-4.
JIN Xi,LU Wei. The application of Lagrange equation in the analysis of electric and electromechanical system[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power,2003,19(4):1-4.
- [6] 鲁炜,靳希. 基于实时操作系统的继电保护软件设计[J]. 继电器,2003,31(11):48-51.
LU Wei,JIN Xi. Protection relay software designing based on real-time operation system[J]. Relay,2003,31(11):48-51.
- [7] 鲁春燕,郑涛,邵宇,等. EHV 输电线路暂态量保护的发展与应用[J]. 电力自动化设备,2004,24(4):78-83.
LU Chun-yan,ZHENG Tao,SHAO Yu,et al. Development and application of transient protection for EHV transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(4):78-83.
- [8] 王更生. JJC-2H 微机继电保护测试仪[J]. 电力自动化设备,2000,20(4):43-44.
WANG Geng-sheng. JJC-2H microcomputer test device for relay protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2000,20(4):43-44.
- [9] 吴国沛,刘育权,任震. 电力系统谐波对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备,2002,22(7):78-79.
WU Guo-pei,LIU Yu-quan,REN Zhen. Interference with relaying protection from harmonic of power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(7):78-79.
- [10] 张保会,哈恒旭,吕志来. 利用单端暂态量实现超高压输电线路全线速动保护新原理研究(一):故障暂态过程分析及实现单端暂态量保护的可行性[J]. 电力自动化设备,2001,21(6):1-5.
ZHANG Bao-hui,HA Heng-xu,LÜ Zhi-lai. Study of non-unit transient-based whole-line high speed protection for EHV transmission line. Part 1: fault analysis and the feasibility of non-unit transient protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(6):1-5.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

鲁炜(1977-),男,江苏南京人,硕士,主要从事继电保护检修工作(E-mail:njluwei@163.com);

靳希(1947-),男,湖南长沙人,院长,教授,研究方向为电力系统自动化(E-mail:jinxiche@online.sh.cn)。

Test and application of power frequency variation distance protection

LU Wei¹,JIN Xi²

(1. EHVC of SMEPC,Shanghai 200063,China;

2. Shanghai Institute of Electric Power,Shanghai 200090,China)

Abstract: Test methods of power frequency variation distance protection are researched. The method in “The rules of power system protection” takes power frequency variation distance element as an over-voltage relay while the computing formula of the method in “The technical questions and answers of power system protection” is based on the traditional distance relay,these two methods are compared. The appropriate test menu for “power frequency variation” is normally built in domestic relay protection test instruments,but it should be calculated and set beforehand for imported instruments. For Shanghai power grid,which has large short circuit capacity and short electrical distance,a method using imported instrument to test power frequency variation distance protection is presented. The necessity of the open condition for power frequency variation protection is analyzed.

This project is supported by the Shanghai Key Project of Science and Technology (041612012) and the Shanghai Leading Academic Discipline Project(P1301).

Key words: power frequency variation distance protection; regulation; test method; open condition