

## 500kV 变压器相间后备保护探讨

张洪, 常凤然, 赵春雷

(河北电力调度通信中心, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 通过分析 500kV 变压器高、中压侧相间阻抗保护对其低压侧相间故障的保护能力, 阐述了变压器低压侧相间故障保护配置的必要性, 并对保护的配置方式提出了建议。

**关键词:** 500kV 变压器; 相间阻抗; 保护配置

**中图分类号:** TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2000)07-0012-04

目前我国电力系统中的 500kV 电力设备在系统运行中都倍受关注, 这不仅因为这些设备造价高, 更因其对电网中的潮流分布及系统的稳定运行有着非常大的影响。在 500kV 网架还不够强大的系统中其影响更大。因此, 合理配置 500kV 电力变压器的保护, 使其在故障发生时确保变压器的安全及系统的稳定运行是我们非常重视的问题。

## 1 500kV 变压器相间后备保护配置与作用

我国运行中的 500kV 变压器大多为单相式自耦变压器, 按技术规程要求, 装设瓦斯保护、过激磁保护、双重差动保护, 同时在其高、中压侧均装设了阻抗保护及零序方向电流保护, 低压侧装设过流保护。这些保护均作用于跳闸。高、中压侧的阻抗保护和低压侧过流保护属变压器的相间后备保护。

由于 500kV 变压器多为单相式变压器, 所以变压器本体不会发生相间故障。在变压器所连接的高、中系统中, 线路保护一般配置了双重纵联保护, 并有完整的后备保护, 这样线路的故障一般会较快地切除, 对变压器影响较小。因此, 变压器的相间后备保护应主要在其各侧母线故障时起作用, 特别是中、低压侧母线的故障(500kV 侧母线设有双套母差保护)。中、低压母线故障流过变压器的短路电流大, 不仅引起变压器绕组过热, 还可能造成绕组的动稳定破坏诱发严重的内部故障。

## 2 高压侧及中压侧相间阻抗保护分析

现有 500kV 变压器一般在高压及中压侧配置相间阻抗保护, 其相间阻抗大多采用带偏移的 0 接线方向阻抗圆特性作为其测量元件, 0 接线的相间测量阻抗表达式为:

$$Z_{AB} = \frac{U_{AB}}{I_A - I_B}; \quad Z_{BC} = \frac{U_{BC}}{I_B - I_C}; \quad Z_{CA} = \frac{U_{CA}}{I_C - I_A}$$

若用对称分量法表示则为:

$$\begin{aligned} Z_{AB} &= \frac{U_1 - aU_2}{I_1 - aI_2}; & Z_{BC} &= \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2}; \\ Z_{CA} &= \frac{U_1 - a^2U_2}{I_1 - a^2I_2} \end{aligned} \quad (1)$$

上式中算子  $a = e^{j120^\circ}$ 。

这种阻抗测量元件对变压器各侧引线及母线相间故障的保护作用到底有多大, 我们希望得到定量的分析结果。

## 2.1 Y 侧阻抗元件对 Y 侧故障的测量值

Y 侧相间阻抗测量元件对变压器另一 Y 侧的相间故障能够准确测量, 这是不须再论证的。当低压侧无电源时, 中压侧母线或引线 BC 相短路时, 高压侧 BC 相的测量阻抗  $Z_{HBC} = Z_H + Z_M$ ,  $Z_{HAB} = Z_{HCA} =$ ; 高压侧母线或引线 BC 相短路时, 中压侧 BC 相的测量阻抗  $Z_{MBC} = Z_H + Z_M$ ,  $Z_{MAB} = Z_{MCA} =$ 。  $Z_H$  为变压器高压侧阻抗,  $Z_M$  为中压侧阻抗, 见图 2。对于其它相的相间短路, 其对应的相间阻抗保护测量元件的测量结果与 BC 相短路时 BC 相的测量阻抗相同。

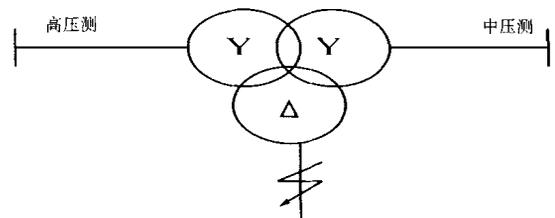


图 1

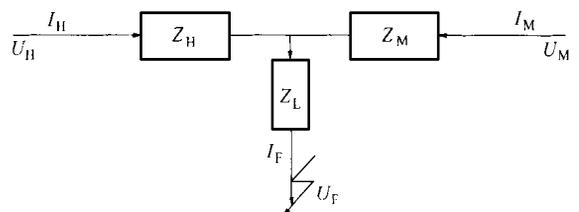


图 2

## 2.2 Y 侧阻抗元件对 侧故障的测量值

对于 Y/Y-11 接线的变压器,当 侧故障时(低压侧无电源),高压侧保护安装处感受到的电压  $U_H$ 、电流  $I_H$ ,中压侧保护安装处感受到的电压  $U_M$ 、电流  $I_M$ (见图 2),与 侧故障电流  $I_F$  之序电流的关系如下:

$$\text{高压侧: } I_{H1} = I_{F1} K_{fH} e^{-j30^\circ} \quad I_{H2} = I_{F2} K_{fH} e^{j30^\circ}$$

$$\text{中压侧: } I_{M1} = I_{F1} K_{fM} e^{-j30^\circ} \quad I_{M2} = I_{F2} K_{fM} e^{j30^\circ}$$

其中  $K_{fH}$  为高压侧电流分支系数,  $K_{fH} = I_{H1}/(I_{H1} + I_{M1})$ ;  $K_{fM}$  为中压侧电流分支系数,  $K_{fM} = I_{M1}/(I_{H1} + I_{M1})$ 。假设系统中各设备正、负序阻抗值相同。

高压侧及中压侧保护安装处感受到的电压序分量为:

$$U_{H1} = (U_{F1} + I_{F1} Z_L) e^{-j30^\circ} + I_{H1} Z_H$$

$$U_{H2} = (U_{F2} + I_{F2} Z_L) e^{j30^\circ} + I_{H2} Z_H$$

$$U_{M1} = (U_{F1} + I_{F1} Z_L) e^{-j30^\circ} + I_{M1} Z_M$$

$$U_{M2} = (U_{F2} + I_{F2} Z_L) e^{j30^\circ} + I_{M2} Z_M$$

上式中  $Z_L$  为变压器低压侧阻抗,见图 2。

将高压侧相间阻抗保护感受到的电压、电流序分量表达式代入式(1)后,可得:

$$\left. \begin{aligned} Z_{HAB} &= \left( Z_H + \frac{Z_L}{K_{fH}} \right) + \frac{U_{F1} * e^{-j30^\circ} - a U_{F2} * e^{j30^\circ}}{K_{fH} (I_{F1} * e^{-j30^\circ} - a I_{F2} * e^{j30^\circ})} \\ Z_{HBC} &= \left( Z_H + \frac{Z_L}{K_{fH}} \right) + \frac{U_{F1} * e^{-j30^\circ} - U_{F2} * e^{j30^\circ}}{K_{fH} (I_{F1} * e^{-j30^\circ} - I_{F2} * e^{j30^\circ})} \\ Z_{HCA} &= \left( Z_H + \frac{Z_L}{K_{fH}} \right) + \frac{U_{F1} * e^{-j30^\circ} - a^2 U_{F2} * e^{j30^\circ}}{K_{fH} (I_{F1} * e^{-j30^\circ} - a^2 I_{F2} * e^{j30^\circ})} \end{aligned} \right\} (2)$$

以变压器 侧 BC 相金属性短路故障为例,此时故障点特殊相的电流电压序分量关系为:  $I_{F1} = -I_{F2}$ ,  $U_{F1} = U_{F2}$  将其代入式(2)中可得:

$$\left. \begin{aligned} Z_{HAB} &= \left( Z_H + \frac{Z_L}{K_{fH}} \right) + \frac{1}{K_{fH} \sqrt{3}} \left( \frac{U_{F2}}{-I_{F2}} \right) e^{-j90^\circ} = \left( Z_H + \frac{Z_L}{K_{fH}} \right) + \frac{1}{K_{fH} \sqrt{3}} Z_2 e^{-j90^\circ} \\ Z_{HBC} &= \left( Z_H + \frac{Z_L}{K_{fH}} \right) + \frac{1}{K_{fH} \sqrt{3}} \left( \frac{U_{F2}}{-I_{F2}} \right) e^{-j90^\circ} = \left( Z_H + \frac{Z_L}{K_{fH}} \right) + \frac{1}{K_{fH} \sqrt{3}} Z_2 e^{-j90^\circ} \\ Z_{HCA} &= \left( Z_H + \frac{Z_L}{K_{fH}} \right) + \frac{1}{K_{fH} \sqrt{3}} \left( \frac{U_{F2}}{-I_{F2}} \right) e^{j90^\circ} = \left( Z_H + \frac{Z_L}{K_{fH}} \right) + \frac{1}{K_{fH} \sqrt{3}} Z_2 e^{j90^\circ} \end{aligned} \right\} (3)$$

其中  $Z_2 = U_{F2}/-I_{F2}$  它的含义应是系统等值到短路点的负序阻抗。在实际系统的短路计算中  $Z_2$  可以很方便地得到。

经推导同样可得中压侧相间阻抗测量元件的感阻抗如下:

$$\left. \begin{aligned} Z_{MAB} &= \left( Z_M + \frac{Z_L}{K_{fM}} \right) + \frac{1}{K_{fM} \sqrt{3}} Z_2 e^{-j90^\circ} \\ Z_{MBC} &= \left( Z_M + \frac{Z_L}{K_{fM}} \right) + \frac{1}{K_{fM} \sqrt{3}} Z_2 e^{-j90^\circ} \\ Z_{MCA} &= \left( Z_M + \frac{Z_L}{K_{fM}} \right) + \frac{1}{K_{fM} \sqrt{3}} Z_2 e^{j90^\circ} \end{aligned} \right\} (4)$$

当 侧三相短路时,因没有负序分量,由(1)式可知三个相间阻抗的测量元件感受的阻抗相同,按金属性三相短路考虑应为:

$$\begin{aligned} Z_{HAB} &= Z_{HBC} = Z_{HCA} = Z_H + \frac{Z_L}{K_{fH}} \\ Z_{MAB} &= Z_{MBC} = Z_{MCA} = Z_M + \frac{Z_L}{K_{fM}} \end{aligned}$$

从上述推导的结论可以看出,在 侧两相相间短路时,Y 侧的相间阻抗元件没有一个能反应保护安装处到故障点的真实距离,其测量值比变压器的阻抗值要大许多。AB 相阻抗保护测量阻抗为无穷大,BC 相增加了滞后于变压器自身阻抗角  $90^\circ$  的分量,而 CA 相则增加了超前于变压器自身阻抗角  $90^\circ$  的分量。图 3 为 BC、CA 相阻抗测量值的示意图,由此可得到更直观的感性认识。

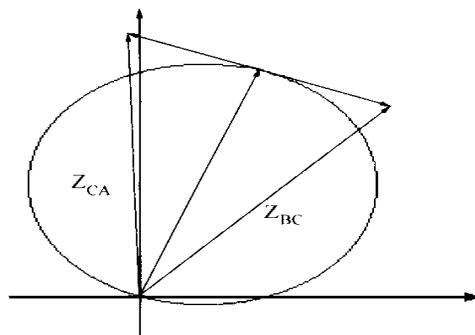


图 3

## 2.3 真实系统参数下 Y 侧阻抗元件对 侧故障的测量值

我网某 500kV 变电站的实际标么参数如下:(基准电压取平均电压,基准容量 1000MVA)

$$K_{fH} = 0.181; \quad K_{fM} = 0.819; \quad X_2 = 0.453;$$

$$X_H = 0.221; \quad X_M = -0.0289; \quad X_L = 0.359$$

在高压电网的实际计算中一般不计阻抗  $Z$  中的电阻分量,而在数值上直接用电抗  $X$  的值代替  $Z$ 。将上述实际数据代入(3)和(4)中并折合成对应电压等级(高压侧为 500kV,中压侧为 220kV)的有名值后

$$\begin{aligned} X_{HAB} &= \infty; \quad X_{HBC} = 606 + 398.27e^{-j90^\circ}; \\ X_{HCA} &= 606 + 398.27e^{j90^\circ} \end{aligned}$$

$$X_{MAB} = \quad ; \quad X_{MBC} = 21.64 + 16.89e^{-j90^\circ} ;$$

$$X_{MCA} = 21.64 + 16.89e^{j90^\circ}$$

要使圆特性的阻抗保护对这样的测量阻抗有保护作用,其定值至少应为 867 (500kV 侧)和 34.8 (220kV 侧)。本站单台变压器,容量为 750 MVA,若满载运行且按负荷阻抗角与相间阻抗保护最灵敏角相差 60° 计算,则为了保证此时保护不误动,经计算可知:高压侧阻抗保护定值应不大于 466,中压侧阻抗保护定值应不大于 45。由此可见,若使高压侧阻抗保护对低压母线短路故障有保护作用,必将大大限制变压器的负载能力,造成其容量的浪费,自然也是投资的浪费;使中压侧阻抗保护对低压母线短路故障有保护作用还是可能的。当高压侧的电源更强时,高压侧测量阻抗会减小,中压侧测量阻抗则增大。由此可得出结论:强电源侧的阻抗测量元件对故障有相对较高的感受能力。

此变压器保护的定值的一次值为:高压侧  $X = 80$ ;中压侧  $X = 15.4$  (要考虑与高、中侧线路保护有配合关系),保护动作方向均指向变压器。只是保证了高压侧阻抗保护对中压母线有 1.5 的灵敏度,中压侧阻抗保护对高压母线有 1.5 的灵敏度,对低压母线的故障均无保护作用。

#### 2.4 多边型特性阻抗测量元件的性能

从上述分析中可以看到,在变压器 Y 侧相间短路时,Y 侧的相间阻抗元件若想起保护作用就要牺牲其负载能力。因此,可以考虑是否有对负荷不限制或较小限制,同时又能具有较大保护范围的其它特性阻抗测量元件。在 110kV 及以上电压等级的线路保护中得到普遍应用的多边型特性的阻抗保护,其特性如图 4 所示。因其电抗定值与电阻定值分别整定,又采用了较合理的边界线倾斜角,从而具有较强的躲负荷电流的能力,同时可具有很大的电抗保护范围。

目前我们接触到的微型变压器保护还未见采用多边型特性实现阻抗保护的,建议微型变压器保护的研制人员及生产厂家在这方面能付出一些努力,研制出更好的、适用范围更大的阻抗保护。以适应于在变压器 Y 侧相间短路时,对 Y 侧的相间阻抗保护有灵敏度要求的场合(如发电厂的三卷升压变压器,低压侧所并机组停运方式)。

### 3 低压侧相间后备保护的必要性及配置原则

“所有运行设备都必须由两套交、直流输入和输

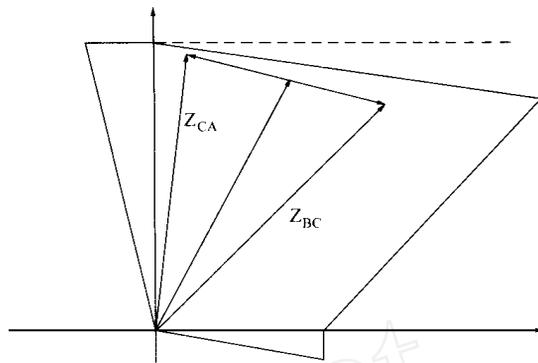


图 4

出回路相互独立,并分别控制不同断路器的继电保护装置进行保护”,这是 DL/T 559—1994《220 ~ 500kV 电网继电保护装置运行整定规程》中所强调的基本要求。

#### 3.1 必要性

对于变压器本体及其引线来说,这个基本要求是被很好的满足了。但 500kV 变电站的低压母线一般不设母差保护,母线故障要靠变压器的后备保护动作切除;对于低压母线上所带的电容器、电抗器及站用变压器等设备故障,主变的低压侧开关应是切除故障的后备开关,其保护应是这些设备保护的后备。通过本文对变压器高、中压侧相间阻抗保护的可知:它们的特性使其对于变压器低压侧的故障很难有保护作用,因此对于低压母线及其母线上所联一次设备的保护作用只能依赖变压器低压侧的保护。此保护不仅关系到低压母线故障时变压器本身的设备安全问题,还将影响此时的电网稳定性。由此可见低压侧相间后备保护很有必要而且非常重要,应当被特别重视。

#### 3.2 配置原则

按所有运行设备都必须由分别控制不同断路器的继电保护装置进行保护的原则要求,对于低压母线的故障就必须配置作用于变压器低压侧断路器和高、中压侧断路器的保护;按所有运行设备都必须由两套交、直流输入和输出回路相互独立的继电保护装置进行保护的原则要求,低压侧后备保护应双重化配置,并要接入不同的 CT 二次线圈,其保护用直流电源应取自不同的直流熔断器,而且要有相互独立的出口跳闸回路;再考虑保护设备的校验停运及异常停运问题,低压侧后备保护应多重化配置,可以保证在任何情况下运行设备都由两套交、直流输入和输出回路相互独立,并分别控制不同断路器的继电保护装置进行保护。

单相式 500kV 变压器的低压侧设有套管 CT,可测量到变压器低压侧各相线圈流过的电流。在近低压侧断路器处还设有外附 CT。这样的 CT 布局方便了低压侧保护多重化的交流电流回路接线要求,可将两套过流(过流 1、2)保护分别接于套管 CT 的不同的二次线圈,另设一套过流(过流 3)保护接外附 CT。

在保护装置设计和制造时,要做到过流 1、2、3 各有自身的直流逆变电源和出口跳闸继电器。在二次回路设计时,要做到使它们的直流电源受不同的熔断器控制,其中一套保护的直流熔断器熔断时不影响另外两套保护的正常运行。在保护出口所跳断路器的设计中,应满足既有跳低压侧断路器的保护段,又有跳变压器各侧断路器的保护段。如过流 3 保护动作跳变压器低压侧断路器,在定值计算中应尽可能使此保护在低压母线故障时以较快速度跳闸,在满足必要的配合关系的前提下,尽量缩短保护动作时间,以提高系统运行的稳定性。过流 1、2 均设两段延时,以第一时限跳变压器低压侧断路器,以第二时限跳变压器各侧断路器。以保证在低压侧断路器拒动或失灵时及变压器低压侧引线故障时,可由变压器高、中压侧断路器切除故障。

#### 4 结论

综上所述,对于高、中压侧都有电源的 500kV 变

压器,其高、中压侧配置的圆特性相间阻抗保护对变压器低压侧引线及母线基本没有保护作用,低压侧母线的故障只能靠变压器低压侧过流保护动作切除,因此要特别重视低压侧过流保护的配置与运行。为了保证变压器的设备安全及系统的稳定运行,变压器低压侧过流保护应多重化配置。合理接入不同的 CT 回路;在直流电源的设计中必须注意各保护运行的独立性及检修的可靠性;安排好保护的出口跳闸方式。真正做到任何情况下运行设备都由两套交、直流输入和输出回路相互独立,并分别控制不同断路器的继电保护装置进行保护。

建议变压器保护的研制人员及生产厂家能多付出一些努力,研制出更好的、适用范围更大的阻抗保护。还可以考虑采用高、中压侧电流相量和,形成不完全差动保护,间接反应低压侧电流,经电压及必要的方向元件闭锁,延时跳变压器各侧开关。用此保护做为低压侧过流保护的后备,解决高、中压侧阻抗保护对低压侧没有保护作用的问题。

收稿日期: 2000-03-01

作者简介: 张洪(1964 - ),女,高级工程师,1988 年起从事继电保护的计算、运行、管理工作; 常凤然(1967 - ),男,工程师,1989 年起从事继电保护的计算、运行、管理工作; 赵春雷(1968 - ),男,工程师,1991 年起从事继电保护的计算、运行、管理工作。

#### Discussion on phase to phase backup protection for 500kV transformer

ZHANG Hong, CHANG Feng-ran, ZHAO Chun-lei

(Hebei Electric Power Dispatch & Communication Center, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** The necessity of installing phase to phase fault protection on LV side of transformer is presented in this paper by analyzing the protection capability of phase to phase impedance protection on HV and MV sides of 500kV transformer against phase to phase fault on its LV side. It also gives some advice on the arrangement pattern of the protection as well.

**Key words:** transformer in 500kV; phase to phase impedance; protection arrangement

(上接第 3 页)

收稿日期: 2000-01-30

作者简介: 汪祖禄(1938 - ),男,高级工程师,长期从事继电保护和电站综合自动化方面的设计和研究工作; 周强

(1968 - ),男,工程师,目前从事继电保护和电站综合自动化方面的设计和研究工作; 陈吉祥(1966 - ),男,工程师,目前从事继电保护和电站综合自动化方面的设计和研究工作; 易先举(1957 - ),男,高级工程师,长期从事继电保护和电站综合自动化方面的设计和研究工作。

#### A view for relay protection system of Three Gorges Power Station

WANG Zu-lu, ZHOU Qiang, CHEN Ji-xiang, YI Xian-ju

(Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** This paper reviews the relay protection system of three gorges left bank power station simply, and tries to show the developing trend of relay protection based on the following six points: generator main-protection, stator ground fault protection, out-of-step protection, transformer protection, 500kV busbar protection and fault forecasting according to the largest unit of three gorges power station.

**Key words:** Three Gorges; generator-transformer group; main protection; view