

750 kV 并联电抗器新原理的匝间短路及单相接地保护研制

郭宝甫¹, 张建国², 赵应兵¹, 姚晴林³

(1 许继集团, 河南 许昌 461000; 2 宁东供电局, 宁夏 宁东 751001; 3 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘要: 提出一种新原理的绝对值比较式零序方向保护, 它既能保护电抗器绕组匝间短路, 又能保护内部单相接地, 它的动作灵敏度及可靠性在原理上比传统的零序功率方向保护及补偿式零序方向保护要高。

关键词: 并联电抗器; 零序方向继电器; 匝间短路

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2005)19-0010-04

1 绝对值比较式零序方向继电器的动作方程

零序方向继电器的动作方程为:

$$|3U_0 - 3I_0 Z_{L0}| > |3U_0 + 3I_0 Z_{S0}|$$

即

$$|U_0 - I_0 Z_{L0}| > |U_0 + I_0 Z_{S0}| \quad (1)$$

上式: 左端为动作量, 右端为制动量。

式中: $3U_0$ 为加于继电器端子的三倍零序电压, 取自电抗器首端电压互感器, 由装置自产获得 $3U_0 = U_A + U_B + U_C$; $3I_0$ 为加于继电器端子的三倍零序电流, 取自电抗器首端电流互感器, 由装置自产获得 $3I_0 = I_A + I_B + I_C$; 要求电抗器首端电流互感器的正极性端必须位于线路侧, 见图 1; Z_{L0} 为电抗器每相零序电抗, $Z_{L0} = Z'_{L0} + Z''_{L0}$; Z_{S0} 为系统每相零序电抗。

1.1 电抗器内部匝间短路

图 1 所示的 I_0 箭头方向规定为 I_0 的正方向, 而此时一次侧 I_0 由 CT 的正极性端流出, 则

$$U_0 = -I_0 Z_{S0} = -I_0 |Z_{S0}| e^{j90^\circ} = I_0 |Z_{S0}| e^{-j90^\circ} \quad (2)$$

U_0 滞后于 I_0 90° , 见图 1。

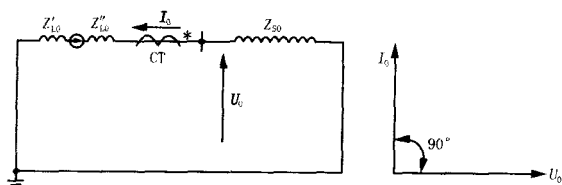


图 1 电抗器内部匝间短路零序网络图及向量图

Fig 1 Zero-sequence network and vector diagram of the reactor internal turn-to-turn short circuit

将式 (2) 代入式 (1), 得

$$|-I_0 Z_{S0} - I_0 Z_{L0}| > |-I_0 Z_{S0} + I_0 Z_{S0}|$$

$$|-I_0 (Z_{S0} + Z_{L0})| > 0$$

动作量很大, 制动量为零, 方向继电器动作最灵

敏。

1.2 电抗器内部单相接地短路

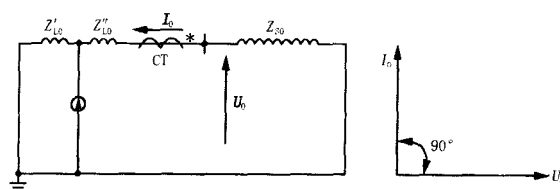


图 2 电抗器内部单相接地零序网络图及向量图

Fig 2 Zero-sequence network and vector diagram of the reactor internal single phase earthing

由图 2 可得:

$$U_0 = -I_0 Z_{S0} \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (1), 所得结论与内部匝间短路同, U_0 滞后于 I_0 90° , 动作量很大, 制动量为零, 方向继电器动作最灵敏。

1.3 电抗器外部单相接地短路

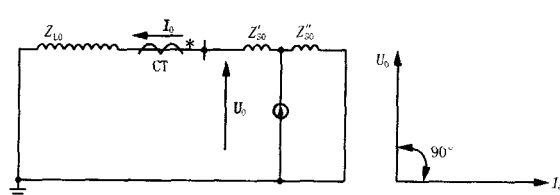


图 3 电抗器外部单相接地零序网络图及向量图

Fig 3 Zero-sequence network and vector diagram of the reactor external single phase earthing

由图 3 可得:

$$U_0 = I_0 Z_{L0} = I_0 |Z_{L0}| e^{j90^\circ} \quad (4)$$

U_0 超前于 I_0 90°

将式 (4) 代入式 (1), 得:

$$|I_0 Z_{L0} - I_0 Z_{L0}| < |I_0 Z_{L0} + I_0 Z_{S0}|$$

$$0 < |I_0 (Z_{L0} + Z_{S0})|$$

动作量为零, 制动量很大, 方向继电器最可靠地不动作。

式(1)中 Z_{L0} 、 Z_{S0} 两个值如果都按实际的电抗器零序阻抗值、系统零序电抗值整定,就可以得到最理想最佳的保护特性:内部匝间或单相接地短路时制动电压为零,继电器最灵敏地动作;外部单相接地短路时动作电压为零,继电器最可靠地不动作。

实际电力系统中,系统的 Z_{S0} 很小,而电抗器的 Z_{L0} 很大,二者不是一个数量级。为了方便用户,减小用户的整定工作量,可将 Z_{S0} 固定为: $Z_{S0} = Z_{L0} / 20$,用户只需整定 Z_{L0} 值,无需整定 Z_{S0} 。如此整定,内部匝间或单相接地短路时动作灵敏度虽非最高,但仍相当高。

2 电抗器内部匝间短路或单相接地的辅助判据

该辅助判据的作用是利用它与主判据(式(1))

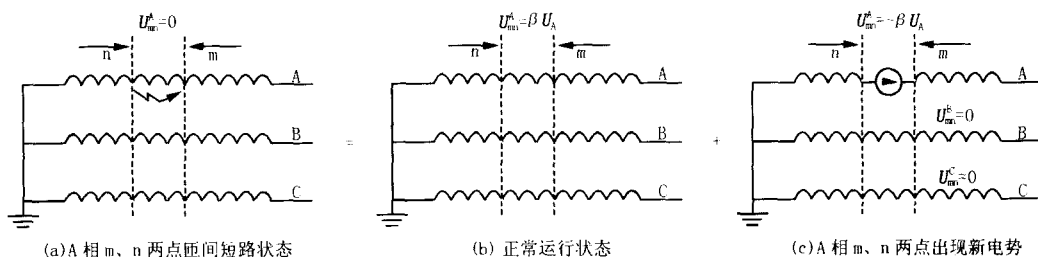


图 4 电抗器匝间短路在短路点出现新电势分析图

Fig 4 New electromotive force analysis diagram at the point of the reactor turn-to-turn short circuit

见图 4(c),在 A 相 m、n 两点之间出现新电势 $U_{mn}^A = -\beta U_A$,但相应地在 B、C 相 m、n 之间并未出现新电势,所以在匝间短路点会出现纵向零序电势 U_{d0} 为:

$$U_{d0} = \frac{1}{3} (U_{mn}^A + U_{mn}^B + U_{mn}^C) = \frac{1}{3} (-\beta U_A + 0 + 0) = -\frac{1}{3} \beta U_A \quad (5)$$

U_{d0} 与相电压 U_A 反相, U_{d0} 的模与 β 成正比,匝间短路的匝数越少, U_{d0} 越小,匝间保护的灵敏度越低。此零序电势产生零序电流 I_0 ,电抗器首端电流互感器的正极性及电流正方向见图 5 所示:图中 $3I_0$ 为故障相(A 相)首端的短路电流正方向, I_{th} 为故障相(A 相)首端负荷电流正方向。

$$U_{d0} = -I_0 (Z_{L0}'' + Z_{S0} + Z_{L0}') = -I_0 Z_{S0} -$$

$$I_0 (Z_{L0}'' + Z_{L0}') = U_0 - I_0 (Z_{L0}' + Z_{L0}'')$$

$$U_0 = U_{d0} + I_0 |Z_{L0}' + Z_{L0}''| e^{j90^\circ} \quad (6)$$

式中: $U_0 = -I_0 Z_{S0} = I_0 |Z_{S0}| e^{-j90^\circ}$, U_0 为匝间保护安装点的零序电压;

U_{d0} 为匝间短路故障点的零序电势,且 U_0 与 U_{d0} 同相位,它们滞后于 $I_0 90^\circ$ 。电抗器匝间短路时,

表达的绝对值比较式零序方向判据)组成"与"门输出,能显著提高保护的防误动能力,增加保护的可靠性,而且不影响电抗器内部匝间短路、单相接地时的动作灵敏度。

2.1 电抗器匝间短路时首端故障相电流

设电抗器 A 相绕组匝间短路,短路的匝数占 A 相绕组总匝数之比为 β , $0 < \beta \leq 1$ 。

利用重叠原理,电抗器 A 相绕组 m、n 两点之间匝间短路状态 ($U_{mn}^A = 0$),相当于正常运行状态 ($U_{mn}^A = \beta U_A$) 与 m、n 两点之间出现一个新电势 ($U_{mn}^A = -\beta U_A$) 状态的叠加,见图 4 所示。图 4(a)的 $U_{mn}^A = 0$ 等于图 4(b)的 $U_{mn}^A = \beta U_A$ 与图 4(c)的 $U_{mn}^A = -\beta U_A$ 的叠加。

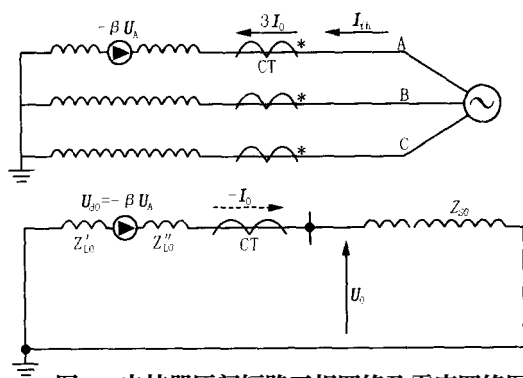


图 5 电抗器匝间短路三相网络及零序网络图

Fig 5 Three-phase network and zero-sequence network diagram of the reactor turn-to-turn short circuit

故障相首端电流 $I_t = I_0 + I_{th}$ 及故障相电压 U_A 、 U_{d0} 、 U_0 的相量关系见图 6 所示。

在图 6 中,电抗器 A 相匝间短路时,短路点的零序电势 U_{d0} 及保护安装处的零序电压 U_0 都与相电压 U_A 反相位,首端故障相(A 相)的短路电流 $3I_0$ 超前于 $U_0 90^\circ$;首端故障相的负荷电流 I_{th} 滞后于 $U_A 90^\circ$,所以 $3I_0$ 与 I_{th} 同相位,二者相加为首端故障相

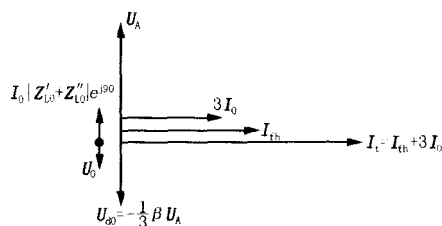


图 6 电抗器 A 相匝间短路首端 A 相电流及有关电压相量图

Fig 6 Phase A positive pole current and interrelated voltage vector diagram of the reactor phase A turn-to-turn short circuit

(A 相)的总电流 I_t 。

$$I_t = 3I_0 + I_{th} = 3I_0 + I_{th} \quad (7)$$

可见,电抗器匝间短路时首端故障相电流 I_t 电流必然大于负荷电流 I_{th} ,得到电抗器匝间短路的辅助判据为:

$$I_t \geq I_{set} \quad (8)$$

式中:动作电流的整定值 $I_{set} = (1.1 \sim 1.15) I_e$, I_e 为电抗器的额定电流。

式 (8) 辅助动作判据按 A、B、C 三相组成“或”门输出。

2.2 电抗器内部单相接地时首端故障相电流

单相接地点距中性点之间的绕组匝间占每绕组总匝数之比为 α , $0 < \alpha \leq 1$ 。电抗器首端电流互感器的正极性及电流的正方向见图 7 所示,图中 $3I_0$ 为故障相 (A 相) 首端的短路电流正方向, I_{th} 为故障相 (A 相) 首端的负荷电流正方向。

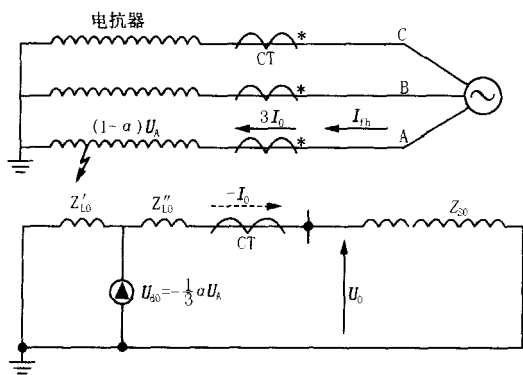


图 7 电抗器内部单相接地三相网络及零序网络图

Fig 7 Three-phase network and zero-sequence network diagram of the reactor internal single phase earthing

单相接地短路点对地的零序电势 U_{d0} 为:

$$U_{d0} = \frac{1}{3} (U_{Ag} + U_{Bg} + U_{Cg}) = \frac{1}{3} [(1 - \alpha) U_A +$$

$$(-U_A)] = -\frac{1}{3} \alpha U_A \quad (9)$$

式中: U_{Ag} 、 U_{Bg} 、 U_{Cg} 为 A、B、C 相对地电压。

U_{d0} 与故障相电压的相位反相, U_{d0} 的模与 α 成正比,单相接地点越靠近中性点, α 越小, U_{d0} 越小,绝对值比较式零序方向保护动作灵敏度越低。

$$U_{d0} = -I_0 (Z''_{L0} + Z_{S0}) = -I_0 Z''_{L0} - I_0 Z_{S0} = -I_0 Z''_{L0} + U_0 \quad (10)$$

$$U_0 = U_{d0} + I_0 Z''_{L0} = U_{d0} + I_0 |Z''_{L0}| e^{j90^\circ}$$

式中, $U_0 = -I_0 Z_{S0} = I_0 |Z_{S0}| e^{-j90^\circ}$, U_0 为保护安装点的零序电压; U_{d0} 为内部单相接地点对地的零序电势。

由式 (10) 可得, U_0 与 U_{d0} 同相位, 它们都滞后于 $I_0 90^\circ$ 。电抗器内部单相接地时故障相相电压 U_A 、 U_{d0} 、 U_0 及故障相首端总电流 $I_t = 3I_0 + I_{th}$ 的相量关系见图 8 所示。

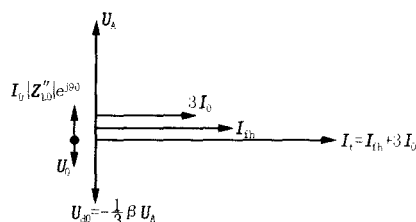


图 8 电抗器内部 A 相接地首端 A 相电流及有关电压相量图

Fig 8 Phase A positive pole current and interrelated voltage vector diagram of the reactor internal phase A earthing

在图 8 中,电抗器内部 A 相接地,接地点的零序电势 U_{d0} 及保护安装处的零序电压 U_0 与相电压 U_A 反相位,首端故障相 (A 相) 的短路电流 $3I_0$ 超前于 $U_0 90^\circ$, A 相的负荷电流 I_{th} 滞后于 $U_A 90^\circ$, 所以 $3I_0$ 与 I_{th} 同相位,二者相加为首端故障相 (A 相) 的总电流 I_t 。

$$I_t = 3I_0 + I_{th} = 3I_0 + I_{th} \quad (11)$$

可见,电抗器内部单相接地时,其物理特征之一也是首端故障相电流必大于负荷电流,式 (8) 所示的辅助判据 ($I_t \geq I_{set}$) 同样也适用电抗器内部单相接地。

3 结论

传统的零序功率方向继电器反映的是功率方向,其灵敏度不但与零序功率方向有关,而且也与 U_0 、 I_0 的大小有关。当电抗器内部匝间短路的匝数很小时 (或内部单相接地点的位置非常靠近中性点时),短路点的零序电势小,继电器测量的 U_0 小、 I_0

小,功率 $U_0 I_0$ 小,继电器有可能拒动,死区较大。而绝对值比较式零序方向继电器反映的是电压,其本质是电压模值的比较;当匝间短路的匝数很小或内部单相接地点的位置非常靠近中性点时,同样继电器测量的 U_0 小、 I_0 小,但继电器的动作量 $|U_0 - I_0 Z_{L0}| = |-I_0(Z_{S0} + Z_{L0})|$ 大。原因是 I_0 虽小,但 Z_{L0} 很大,致使以电压为量纲的动作量大,而制动电压为零,因而继电器仍可能动作,死区较小,这是本文提出的绝对值比较式零序方向继电器在原理上的本质优点。

采用上述方案的 750 kV 并联电抗器微机保护装置在北京清河国家电力公司电力科学研究院主持的“西北 750 kV 系统电网动模试验”中获得圆满成功,性能优良。

Research and design on 750 kV parallel connection reactor new theories of the turn-to-turn short circuit and single phase earthing protection

GUO Bao-fu¹, ZHANG Jian-guo², ZHAO Ying-bing¹, YAO Qing-lin³

(1. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 2. Ningdong Power Supply Bureau, Ningdong 751001, China; 3. Hefei Technical University, Hefei 230009, China)

Abstract: A new type zero-sequence directional protection based on the comparison of absolute value is presented in the paper. It can protect not only the reactor turn-to-turn short circuit, but also the internal single phase earthing protection. From the point of view of the theory, the sensitivity and reliability of this new type protection are higher than the traditional zero-sequence directional protection or the compensatory zero-sequence directional protection.

Key words: parallel connection reactor; zero-sequence directional relay; turn-to-turn short circuit

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
WANG Wei-jian. Electric Main Equipment Protection Their Theory and Application, Second Edition [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.

收稿日期: 2005-05-20; 修回日期: 2005-08-10

作者简介:

郭宝甫(1973-),男,大学本科,工程师,主要从事继电保护装置研究与开发; E-mail: baofug@xjgc.com

张建国(1968-),男,工程硕士,高级工程师,主要从事继电保护应用工作;

赵应兵(1973-),男,本科,工程师,主要从事继电保护装置研究与开发。

(上接第 4 页 continued from page 4)

GUO Zheng, HE Jia-li. Novel Principle of Pilot Differential Relay Protection of Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 1-5.

- [2] 郭征. 特高压长线路分相电流差动保护新原理(博士学位论文)[D]. 天津:天津大学, 2004.

GUO Zheng. New Principle of Phase Segregated Current Differential Protection for UHV Long Transmission Lines, Doctoral Dissertation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.

Distance protection based on Bergeron model for UHV transmission lines

XUE Shi-min, HE Jia-li, LI Yong-li

(School of Electric Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: New principle of distance protection of ultra high voltage (UHV) transmission lines based on a Bergeron model is proposed. Method of calculating transmission line faults by using Bergeron model is presented. A new principle of distance protection and its criterion are advanced. The protection performances at various fault conditions are deduced. Simulation results by ATP and MATLAB confirm that the principle is correct.

Key words: distance protection; Bergeron model; UHV transmission lines

收稿日期: 2005-07-23

作者简介:

薛士敏(1980-),女,博士,主要研究方向电力系统继电保护; E-mail: xsm@tju.edu.cn

贺家李(1925-),男,教授,中国电机工程学会名誉理事, IEEE 高级会员,俄罗斯工程院外籍院士,主要研究方向为电力系统故障分析与继电保护;

李永丽(1963-),女,教授,主要研究方向为电力系统继电保护和变电站综合自动化。