

特高压站用电并联电抗器匝间保护分析

张春合¹, 高旭², 沈全荣¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 华北电网有限公司, 北京 100053)

摘要: 针对不直接接地运行的干式电抗器, 当其发生匝间故障时, 过流保护灵敏度较低, 存在较大的保护死区, 差动保护也无法反映匝间故障。一般来讲, 负序过流保护比过流保护有更高的灵敏度, 分析了负序过流保护、负序方向过流保护、过流保护在特高压站用电系统中 110 kV 并联电抗器的保护性能, 最后提出了识别干式电抗器匝间故障的方法。

关键词: 并联电抗器; 匝间保护

Analysis of inter-turn protection in shunt reactor in ultra-high-voltage substation-used power system

ZHANG Chun-he¹, GAO Xu², SHEN Quan-rong¹

(1. NARI-Relays Electric Co., Ltd, Nanjing 211102, China; 2. North China Grid Co., Ltd, Beijing 100053, China)

Abstract: When inter-turn failure of shunt dry type reactor happens in neutral indirectly grounded system, overcurrent protection has very low sensitivity and large dead zone and differential protection can not reflect the inter-turn failure. As a general rule, negative sequence overcurrent protection has higher sensitivity than overcurrent protection, it is analyzed in ultra-high-voltage substation-used power system along with overcurrent protection. New method is introduced for distinguishing dry type reactor inter-turn failure.

Key words: shunt reactor; inter-turn protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0053-04

0 引言

随着我国电网建设的发展, 不直接接地系统中干式并联电抗器的应用更为普遍。由于其重要性程度比不上主变压器、高压输电线路等, 目前, 国内外对此电抗器主要的故障之一——匝间短路的研究还非常少, 绝大多数都是针对相电流采取仅取电流速断保护和限时过流保护。一般主保护为 3 倍额定电流以上电流速断保护, 同时配置为 1.4~1.5 倍额定电流以上的限时过流保护, 延时 0.5 s, 从全国各地出现的事故情况看, 干式空心并联电抗器的绝大多数事故都是在值班人员发现滚滚浓烟甚至冲天大火之后采取手动操作, 才将故障电抗器切除, 而这时电抗器已经被烧得体无完肤。因此, 干式空心电抗器的过流保护无论是速断还是延时保护对匝间短路几乎是无效的, 多数情况下没有实现预期的继电保护效果。

本文结合特高压工程, 详细分析了负序过流保护、负序方向过流保护、过流保护在特高压站用电系统中 110 kV 并联电抗器的保护性能, 提出了解决识别干式电抗器匝间短路的新思路。

1 目前应用的匝间保护

首先, 对于不直接接地系统, 无法实现零序阻抗等匝间保护。微机型继电保护装置容易实现故障序分量的计算, 目前有使用负序过流等保护, 只是此保护的负序电流定值不能太小(电流或电压采样精度的限制), 同时还要整定较长的延时以防止在区外故障时电抗器保护误动。负序功率方向原理构成的匝间保护是通过判断负序电压和负序电流之间的相位关系, 明确故障时负序功率的流向以确定故障发生在区内还是区外, 可以较好地解决较长动作延时问题, 为此定义负序功率方向保护的负序电压取自电抗器引出端线路上的负序电压; 负序电流取自电抗器的高压侧, 正方向为线路流向电抗器。

负序功率方向匝间短路保护判据:

$$-90^\circ \leq \arg \frac{\dot{U}_2 e^{-j\varphi_m}}{\dot{I}_2} \leq 90^\circ \quad (1)$$

负序过流保护、负序方向过流保护、过流保护对于干式并联电抗器匝间故障都有一定的反映, 下面作详细分析。

2 结合特高压工程的匝间保护分析

特高压系统如图1所示。

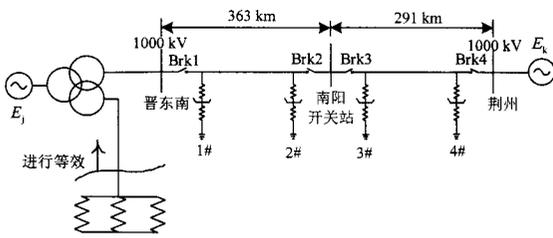


图1 特高压系统
Fig.1 UHV system

特高压站用电系统110 kV侧都配置了电抗器，110 kV侧为中性点不接地系统。

2.1 复合序网图和初步分析

图2为并联电抗器和输电线路连接的等效示意图，当并联电抗器A相发生匝间故障，阻抗变化后的值为 Z_F ， Z_L 为电抗器的值^[1]。

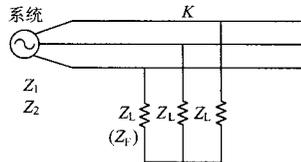


图2 并联电抗器的系统图
Fig.2 Shunt reactors in power system

由独立的序网络，有式(2)：

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka1} = \dot{E}_{a1} - \dot{I}_{ka1} Z_1 \\ \dot{U}_{ka2} = -\dot{I}_{ka2} Z_2 \\ \dot{U}_{ka0} = -\dot{I}_{ka0} Z_0 \end{cases} \quad (2)$$

K 点为短路点， Z_1 ， Z_2 为系统正负阻抗。从电抗器安装位置向电抗器自身看，可以得出三个边界条件方程：

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka} = \dot{I}_{ka} Z_F \\ \dot{U}_{kb} = \dot{I}_{kb} Z_L \\ \dot{U}_{kc} = \dot{I}_{kc} Z_L \end{cases} \quad (3)$$

由于不接地系统零序电流 $\dot{I}_{ka0} = 0$ 。式(3)可转换为以对称分量表示的关系式如下：

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka1} = Z_L \dot{I}_{ka1} + \frac{1}{3}(Z_F - Z_L)(\dot{I}_{ka1} + \dot{I}_{ka2}) \\ \dot{U}_{ka2} = Z_L \dot{I}_{ka2} + \frac{1}{3}(Z_F - Z_L)(\dot{I}_{ka1} + \dot{I}_{ka2}) \end{cases} \quad (4)$$

由两个结果做序网图3。

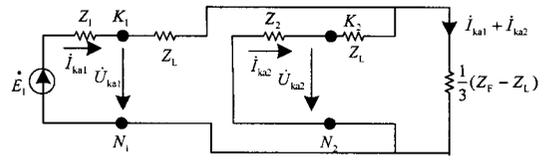


图3 K点故障的序网图

Fig.3 Sequence network when fault occurs at K point

初步分析可知，轻微匝间故障时 $z = \frac{1}{3}(Z_F - Z_L)$ 很小，而 $z \ll Z_2 + Z_L$ 。因此，正序电流可以近似为

$$\dot{I}_{ka1} = \frac{\dot{U}_{ka1}}{Z_L + z // (Z_2 + Z_L)} \approx \frac{\dot{U}_{ka1}}{Z_L}$$

可见，当短路匝数很少时，正序电流变化很小，因此，过流保护对匝间故障没有足够的灵敏度。另外负序电流在轻微匝间故障时，值很小，其大小也可能不足以判定匝间故障。

2.2 电抗器单绕组短路

特高压站用电系统电抗器容量为 $S_n = 240$ Mvar， $U_n = 105$ kV，为目前国内容量最大的干式并联电抗器。采用的接线方式，12个绕组并联成一个绕组，再串联，如图4所示，每一个分支绕组的匝间故障由匝间故障复合序网图和电抗器内部接线图可得式(5)：

$$I_{ka2} = \frac{E_1 \times \frac{1}{3}(Z_F - Z_L)}{(Z_L + Z_2) + \frac{1}{3}(Z_F - Z_L)} \quad (5)$$

$$I_{ka2} = \frac{E_1 \times \frac{1}{3}(Z_F - Z_L)}{(Z_1 + Z_L) + (Z_2 + Z_L) // (\frac{1}{3}(Z_F - Z_L))}$$

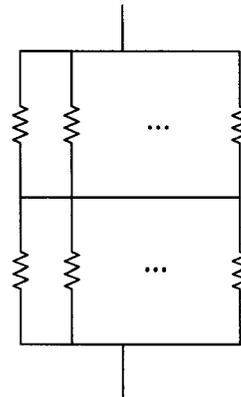


图4 电抗器内部接线

Fig.4 Reactor connection in UHV

I_{ka2} 为负序电流， $Z_F = 1 - 0.1 * k$ ，其中 $10 * K\%$ 为电抗器

短路阻抗比。CT变比1600/1 A。由此可计算出正序电流, 故障相电流应为正序电流和负序电流的和。

2.3 计算结果和分析

根据2.1和2.2的内容, 经过系统参数的归算和电抗器的匝间故障复合序网的建立, 不考虑CT, PT等的传变误差, 进行计算。

1) 负序二次相电流、相电压和电抗器短路阻抗比的关系

负序二次相电流、相电压和电抗器短路阻抗比(即匝间故障时, 短路阻抗占电抗器单相阻抗的百分比)的关系图(图5、图6)。

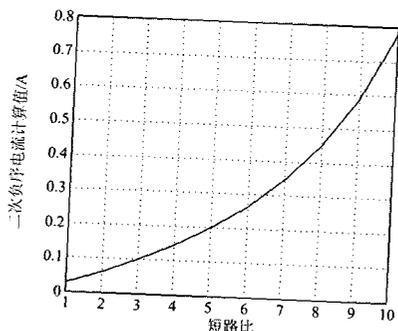


图5 负序二次相电流和电抗器短路阻抗比的关系图

Fig.5 Diagram of negative secondary current and short circuit impedance ratio

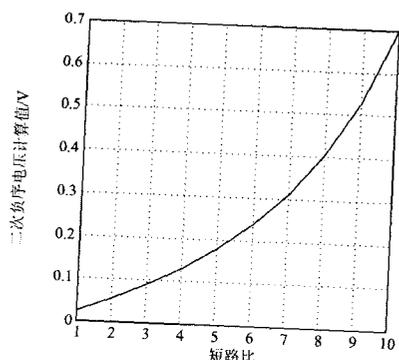


图6 负序二次相电压和电抗器短路阻抗比的关系图

Fig.6 Diagram of negative secondary voltage and short circuit impedance ratio

从图5、图6可知, 在实际工程应用中, 负序过流保护考虑可靠系数1.1, 同时电抗器绕组偏差最大4%, 三相负荷的不对称, 设最小整定电流为0.15 A, 则负序电流保护元件可保护电抗器整个阻抗的45%以上, 即保护死区范围为电抗器整个阻抗的45%; 同样对于负序功率保护, 设最小门槛电压为0.2 V, 则负序功率保护元件可保护电抗器整个阻抗的50%以上, 即保护死区范围为电抗器整个阻抗的50%。

2) 负序二次相电流、相电压和电抗器单绕组短

路阻抗比的关系

对于特高压工程110 kV电抗器的接线方式, 12个绕组并联, 再串联, 可以得到负序二次相电流、相电压和电抗器每个绕组短路阻抗比的关系图(图7、8)。

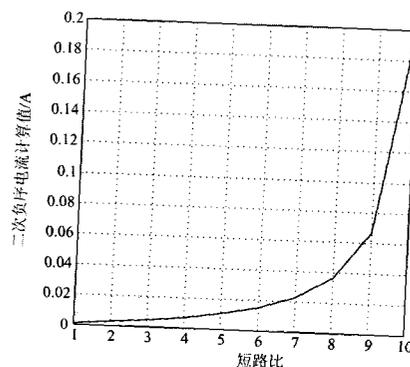


图7 负序二次相电流和电抗器每个分支绕组短路阻抗比的关系图

Fig.7 Diagram of negative secondary current and short circuit impedance ratio of reactor single windings

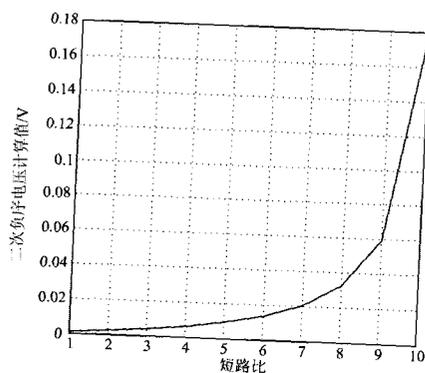


图8 负序二次相电压和电抗器每个分支绕组短路阻抗比的关系图

Fig.8 Diagram of negative secondary voltage and short circuit impedance ratio of reactor single windings

在保护装置的最小整定电流0.1 A处, 电抗器单节短路比在90%以上。当整个分支全部短路, 也就是单相阻抗的50%, 则负序电流为0.2 A左右。可见对于一个分支而言, 由于该工程电抗器特殊的接线方式, 极大地降低了负序保护的灵敏度。

实际应用中, 考虑了最小整定电流和最小门槛电压, 则负序电流保护元件可保护电抗器单分支阻抗的95%以上, 即保护死区范围为电抗器单分支阻抗的95%; 负序功率保护的死区范围为电抗器单分支阻抗的100%。

3) 故障相电流和电抗器短路阻抗比的关系

对于过流保护, 可以得到故障相电流和电抗器

短路阻抗比的关系图。

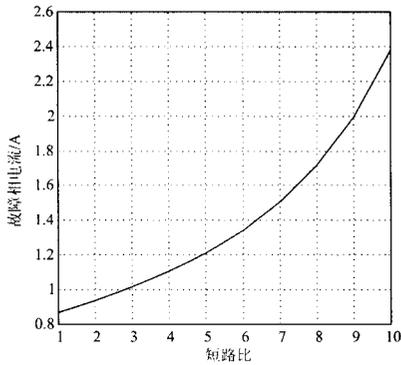


图9 故障相电流和电抗器短路阻抗比的关系图
Fig.9 Diagram of secondary current and short circuit impedance ratio

考虑一般电抗器过流保护的定值为 1.3~1.5 倍电抗器额定电流,有名值为 1.07~1.24 A 左右,考虑可靠性,取 1.5 倍定值,对应图 9 的曲线,则过流保护元件可保护电抗器整个阻抗的 55%以上,即保护死区为 55%。

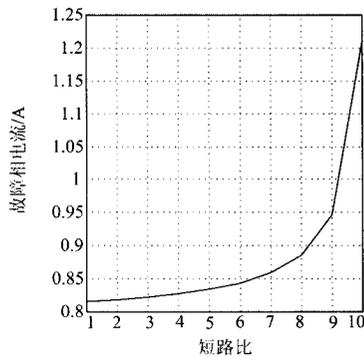


图10 故障相电流和单分支电抗器短路阻抗比的关系图
Fig.10 Diagram of secondary current and short circuit impedance ratio of reactor single windings

同样道理,由图10,过电流保护元件对于电抗器单分支的死区范围100%。

4) 分析

其实系统阻抗对负序电流的影响很小,几乎可以用0来代替。而同时由于负序电压是和背侧阻抗也就是系统阻抗相关,其值当然更小。

110 kV并联电抗器发生匝间故障时,负序过流保护的灵敏度相对于过流保护的灵敏度有一定提高,死区范围相应有一定缩小:对于电抗器单绕组阻抗,保护的死区范围由100%降低到90%。

同样,负序功率方向保护可以得到灵敏度稍小于负序过流保护的效果。但从实际应用情况来讲,电抗器单绕组发生10%以上短路的时候,可能已经早已有浓烟甚至大火,失去了修复的意义。

3 电抗器不平衡保护

鉴于过流保护和负序保护不能对匝间绝缘故障提供有效保护,借鉴电容器的一次接线方式和保护配置,将每相电抗器接为两个绕组,三相电抗器,共计6个绕组接成双星,两个中性点之间加装一台不平衡电流互感器(接线方式见下图),以中性点不平衡电流保护作为匝间主保护。

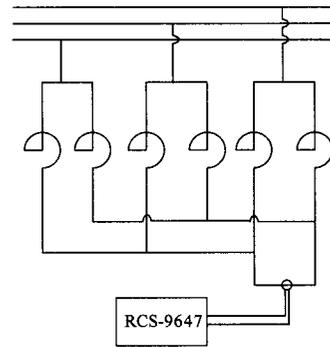


图11 电抗器不平衡电流保护配置图

Fig.11 Scheme of unbalanced overcurrent relay

正常状态下的不平衡电流限值目前难以具体明确。若将每相内部的常态差动电流限制在额定电流1.33%以下,三相总和即中性点不平衡电流限制在4%以下,可靠系数取1.25(综合考虑电压波动、互感器偏差、磁场干扰等),整定值则为电抗器额定电流的5%,时延0.5 s以躲过合闸时非周期分量的影响。在正常情况下,电抗器分裂绕组间存在比较大的差动电流。

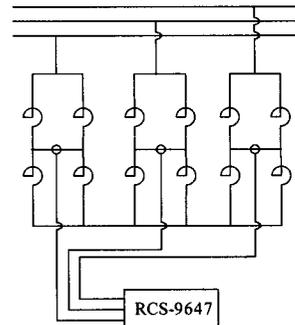


图12 电抗器桥差电流保护配置图

Fig.12 Scheme of unbalanced overcurrent relay

不平衡电流保护具备最大相电流(负荷电流)补偿自然不平衡电流的功能,补偿比率K可以整定,K应根据电抗器的不平度来整定。

$$I_{UN} \geq I_{UNZD} + K * I_{MAX} \quad (6)$$

(下转第 60 页 continued on page 60)

4 结论

遗传算法是解决无功优化类离散寻优问题的有效方法。但普通遗传算法易陷入早熟收敛的特性限制了其在此类问题中的直接应用。本文采用了伪并行运算的改进遗传算法,采用多个种群同时按照不同参数进化,以保持较优个体在种群中的比例,同时采用种群间个体迁移交换策略,以保证个体多样性。此方法可以显著提高算法的计算速度和全局收敛能力,为大规模复杂配电系统的无功优化规划提供了有效的思路。

参考文献

[1] 胡海燕,武晓朦,刘健.基于遗传算法的配电网低压侧无功补偿动态优化规划[J].电力自动化设备,2005,25(3):25-29.
HU Hai-yan, WU Xiao-meng, LIU Jian. Genetic Algorithm Based Optimal Dynamic Planning of Low-voltage Side Reactive Power Compensators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(3):25-29.

[2] 张敬平,梁志瑞,苏海锋,等.基于改进拥挤小生境遗传算法配网无功优化研究[J].继电器,2007,35(10):19-22.
ZHANG Jing-ping, LIANG Zhi-rui, SU Hai-feng, et al. Research on Reactive Power Optimization of Distribution Network Based on the Improved Crowding Niche Genetic Algorithm[J].Relay, 2007,35(10):19-22.

[3] 任震,唐卓尧,等.电网无功优化的改进遗传算法[J].电力自动化设备,2002,22(8):16-19.
REN Zhen, TANG Zhuo-yao, et al. Improved Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization of Electric

Network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(8):16-19.

[4] 倪炜,单渊达.具有优化路径的遗传算法应用于电力系统无功优化[J].电力系统自动化,2000,24(21):40-44.
NI Wei, SHAN Yuan-da. A Refined Genetic Algorithm with Optimal Searching Path Used in Power System Reactive Power Optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000,24(21):40-44.

[5] 杨丽徙,徐中友,朱向前.基于改进遗传算法的配电网无功优化规划[J].华北电力大学学报,2007,34(1):26-30.
YANG Li-xi, XU Zhong-you, ZHU Xiang-qian. Optimization of Reactive Power Planning of Distribution Systems Based on Improved Genetic Algorithm [J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(1):26-30.

[6] 玄光男,程润伟.遗传算法与工程设计[M].北京:科学出版社,2000.
XUAN Guang-nan, CHENG Run-wei. Genetic Algorithms and Engineering Design[M]. Beijing: Science Press,2000.

[7] Civanlar S, Grainger J J. Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators Part III: the Numerical Results[J]. IEEE Trans on PAS, 1985,104(11): 3291-3305.

收稿日期: 2008-10-20

作者简介:

史燕琨(1972-),男,工学博士,主要从事配电网优化及电能质量分析与控制等方面研究; E-mail:shiyk@163.com
熊华强(1975-),男,工程师,主要从事电力系统调度管理工作。

(上接第 56 页 continued from page 56)

可考虑采用浮动固定门槛+恰当的浮动门槛,仅考虑稳态量不平衡电流保护,波动的数据不好确定。

另外一种方式类似电容器桥差接线,如图12所示。

以上方案缺点是在电抗器本体设计时就要考虑该问题,而国内的电抗器目前还没有以上两种接线方式的应用。

4 结论

本文建立了特高压站用电系统中 110 kV 并联电抗器匝间故障的复合序网图,并由此分析了负序过流保护、负序方向过流保护、过流保护保护性能,最后借鉴电容器的保护思路,提出了解决识别干式电抗器匝间短路的新方法。

参考文献

[1] 李斌,李永丽,陈军.超高压输电线路并联电抗器的匝间短路保护[J].天津大学学报, 2005,38(8):63-67.
LI Bin, LI Yong-li, CHEN Jun. Turn-to-Turn Faults Protection of EHV Shunt Reactors[J]. Journal of Tianjin University, 2005,38(8):63-67.

收稿日期: 2008-10-29; 修回日期: 2008-11-20

作者简介:

张春合(1974-),男,硕士,工程师,从事继电保护与变电站自动化研究工作; E-mail:zhangch@nari-relays.com
高旭(1975-),男,硕士,工程师,主要从事华北电网 500 kV 及京津唐电网 220 kV 继电保护整定计算工作;
沈全荣(1965-),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电力系统继电保护的研究、开发和管理工作的。