

电抗器间隔断路器后置式接线所引起二次问题研究

陈 昊¹, 邓广静², 王玉荣³, 孟 玮¹

(1.江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 210000; 2.江苏省电力设计院, 江苏 南京 211012;
3.东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 500kV 变电站 35kV 侧接线方式有多种, 投运较早的 500kV 变电站 35kV 电抗器间隔常采用断路器后置式接线方式, 这种接线方式虽在一定程度上节省了成本, 但同时造成了二次上的一些问题。本文结合华东地区 500kV 某变电站一起 35kV 电抗器故障实例, 分析了由于断路器后置式接线方式所引起的二次问题, 包括故障相判别错误、相邻电抗器间隔低电流保护误动、保护持续动作不返回。最后针对上述问题提出了相应的应对措施。

关键词: 电抗器; 断路器后置式; 低电流保护; 选相逻辑

0 引言

500kV 变电站低压侧常配置并联电抗器, 35kV 电抗器和 35kV 电容器组配合以调节变电站的无功功率^[1-4]。目前华东地区 500kV 变电站低压侧电抗器间隔接线方式主要有三种类型。其中, 早期投运的 500kV 变电站, 35kV 电抗器经常选用断路器后置式接线。这种接线方式优点在于可以选用轻型的断路器, 节约了设备成本, 同时亦在一定程度上节约了一次现场场地空间, 故在 2000 年前投运的 500kV 变电站中多有采用。但是也应该看到, 这种接线方式在拥有上述优点的同时亦有其代价。当电抗器发生故障^[5-9]时, 后置式接线有可能导致二次(主要是继电保护)上一些问题, 引起现场工作人员判断困难, 目前文献中对此类问题的讨论较少, 对接线方式对保护动作行为影响的研究尚不充分。本文以华东地区一起 35kV 电抗器故障为例, 分析了后置式接线对继电保护的影响, 并提出了相应的事故应对措施。

1 500kV 变电站 35kV 侧断路器配置方式述评

考察华东地区 500kV 变电站低压侧电抗器间隔接线方式, 可发现 35kV 断路器配置方式大体可分为三类。

1.1 不设 35kV 总断路器

这种方式低压侧不设 35kV 总断路器, 而在各个 35kV 电抗器间隔配置断路器, 如图 1。

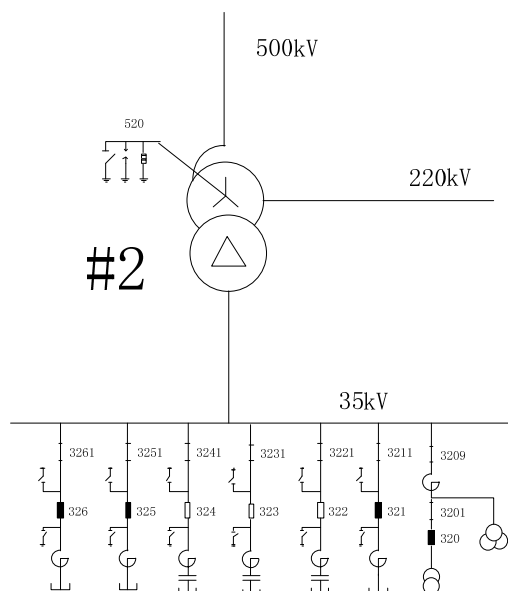


图 1 35kV 接线方式一

Fig.1 Type I 35kV wiring

其优点在于, 降低了投资, 节约了一次场地空间, 当电抗器发生故障时, 跳本间隔断路器, 隔离故障。由于不设置 35kV 总断路器, 如电抗器发生故障且跳本间隔断路器失败或发生 35kV 母线故障^[10], 则有可能由主变保护跳开变压器各侧断路器, 此时 500kV 主变将退出运行。近年投运的 500kV 变电站基本都采用这种方式。

1.2 设 35kV 总断路器且电抗器断路器前置

这种方式低压侧设 35kV 总断路器, 且在各个 35kV 设备间隔配置断路器, 断路器靠近 35kV 母线, 如图 2。

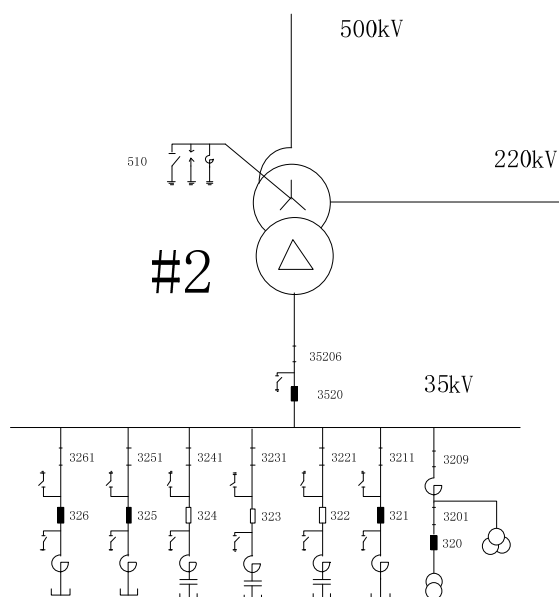


图 2 35kV 接线方式二

Fig.2 Type II 35kV wiring

该方式安全性较高，电抗器故障时，跳开本间隔断路器隔离故障，万一跳本间隔断路器失败，还留有跳 35kV 总断路器的余地，主变 500kV 侧和 220kV 侧受 35kV 侧故障波及的概率很低。其缺点在于较方式一增设了一台断路器，增加了投资。此外，占用一次场地空间较大。

1.3 设 35kV 总断路器且电抗器断路器后置

这种方式低压侧设 35kV 总断路器，且在各个 35kV 设备间隔配置断路器，电抗器靠近 35kV 母线，断路器远离母线，如图 3。

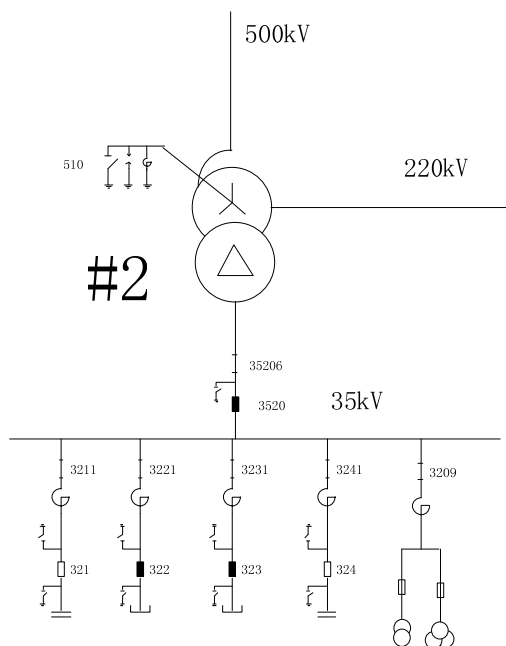


图 3 35kV 接线方式三

Fig.3 Type III 35kV wiring

该方式的优点在于后置断路器可以采用轻型断路器，降低了投资，亦稍有助于节省一次场地空间，当电抗器发生故障或 35kV 母线故障时，直接跳主变 35kV 总断路器。电抗器间隔断路器只在平时起操作电抗器的作用。这种方式在华东地区早期上投运的 500kV 变电站中常有应用。在实际运行中，这种接线方式保护的配置方式存在隐忧，在一定条件下电抗器低电流保护存在不正确动作的可能。

2 后置式接线的二次问题

如图 3 的接线方式，由于 TA 安装在电抗器负荷侧，远离母线，电抗器保护配置常常使用低电流保护（有些文献作欠电流保护）。一般情况下，35kV 电抗器发生故障，流进电抗器间隔 TA 的电流会有所降低，低电流保护能通过跳 35kV 总断路器将故障隔离，使故障不危及 500kV 主变。实际运行中某些特定情况下，这种方式未必尽善。以早期 500kV 站标配的某典型低流保护为例^[1]，分析一下 35kV 故障发生时可能出现的二次问题。

2.1 低流保护故障相别指示问题

该电抗器保护早期版本（R1.02.1）的低电流保护判相逻辑存在缺陷，有导致故障相别指示错误的可能。

其判相逻辑为：取三相电流的最小相电流的 X_{set} 倍（如 1.25 倍）为基准，各相电流与之相比，低于此值的相别判为故障相。

这种选相逻辑在理想情况下应能报出故障相，但实际应用中存在问题，如发生电抗器 AB 相间故障，尾端 TA 的 A 相电流极低，B 相电流亦低，但大于最小相电流的 X_{set} 倍，此时判相逻辑只报出 A 相有故障，而不能报出 B 相故障。只要电流最小相和其他故障相电流差距较大，其他故障相的信息必然被掩盖，可能给现场人员故障相判断增加困难。

2.2 相邻非故障电抗器间隔保护误动作问题

由低电流保护的逻辑可知，保护动作取决于保护感受到的流经 TA 的电流。当如果是相邻电抗器间隔或其他地方发生故障，故障电流流向故障点。此时，35kV 母线的电压通常会减低，流经本 35kV 电抗器间隔 TA 电流可能减小甚至低于低电流保护定值。此时该间隔配置的低电流保护将误判为本间隔故障，保护动作跳开 35kV 总断路器。

该问题是由于断路器后置接线方式下低流保护动作原理不完善造成的，此问题出现概率不低，

华东地区某 500kV 站 2012 年就发生过两起非故障电抗器间隔保护感受到流经 TA 电流变小而动作的案例。

2.3 低电流保护持续动作不返回

电抗器保护（或主变后备保护）动作切除 35kV 总开关后，经常会出现电抗器低电流保护一直保持在动作状态，长时间不返回，常被现场变电站运维人员列为疑点。

低电流保护采用断路器位置闭锁，如果电抗器保护装置接收到的跳闸位置变为“1”，低电流保护动作才满足返回条件。但是由于电抗器保护装置的操作回路接入的是电抗器间隔的后置的断路器，而不是 500kV 变压器 35kV 侧的总断路器。当故障电抗器低电流保护动作之后，即使 35kV 总断路器成功跳开，但电抗器间隔断路器仍处于合位，因此低电流保护仍然持续动作而不能返回。直到后置式断路器断开后，电抗器低流保护才能得以返回。

实践经验证明，电抗器选用断路器后置式接线，配置，1，3 两条缺陷都有其必然性，第 2 条在不利条件下亦会发生。下面结合一起华东地区某 500kV 变电站 35kV 电抗器故障实际案例，分析后置式接线方式可能存在的问题。

3 实际故障分析案例

3.1 故障经过

华东地区某 500kV 变电站#2 变 35kV 侧#3 电抗器发生 B 相故障（开裂的包封绝缘遇雨发生匝间短路并起火），后 A 相电抗器支柱瓷瓶发生雨闪，故障发展为 AB 相故障，相间故障持续 120ms 后，C 相引线支柱瓷瓶闪络，故障发展成三相故障，三相故障持续 480ms 后，#2 变#2 电抗器保护和#2 变#3 电抗器保护的低电流保护、#2 变保护后备保护均动作，跳开变压器 35kV 侧总断路器 3520。

#2 变#2 电抗器保护、#3 电抗器保护的配置均为南瑞继保的 RCS-9647，#2 变主变保护为国电南自的 PST1201。

B 相单相故障时期，主变后备保护、电抗器保护均不反应故障，故未启动。故障发展为 AB 相间故障时主变保护、电抗器保护启动，主变低压侧过流保护、电抗器保护延时均整定为 0.6s，在这段延时期间，相间故障进一步发展为三相故障，低压侧过流保护跳 35kV 侧断路器断路器 3520，总延时亦与整定延时 0.6s 一致。

3.2 故障间隔电抗器保护动作行为分析

电抗器保护装置拥有一段经跳闸位置闭锁的低电流保护（定值为 0.43A，0.6s）。其逻辑如图 4。

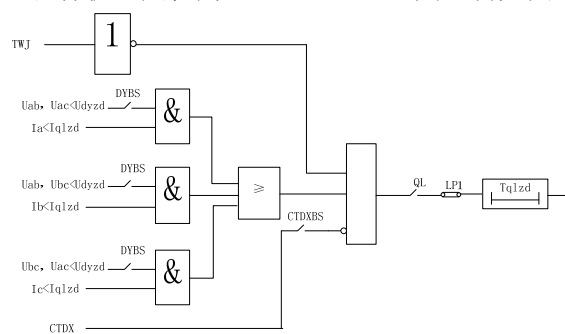


图 4 低电流保护逻辑图

Fig.4 the Logic diagram of undercurrent protection

由图 4 可知，在满足 TWJ 要求和无 TA 断线闭锁条件的前提下，当某相电流低于定值且满足低电压解锁要求时，低电流保护将延时跳闸。

#2 变#3 电抗器为故障点所在，由于保护 TA 装在负荷侧，当电抗器内部相间故障后，电抗器保护感受到的电流减小，#2 变#3 电抗器保护低电流保护经延时 0.6s 动作。#2 变#3 电抗器保护装置报文如下（已折算成相对时间）

0000ms	启动		
0608ms	IAC	0.05A	低流保护动作
173116ms	IABC	0.00A	低流保护动作

报文记录整组启动后延时 608ms 低电流保护动作，相别显示为 AC 相。易见，此时电抗器保护故障相判别出现了错误，本次故障并没有经历 AC 相间故障过程，而且报文时间和三相故障发生时间也无法对应。

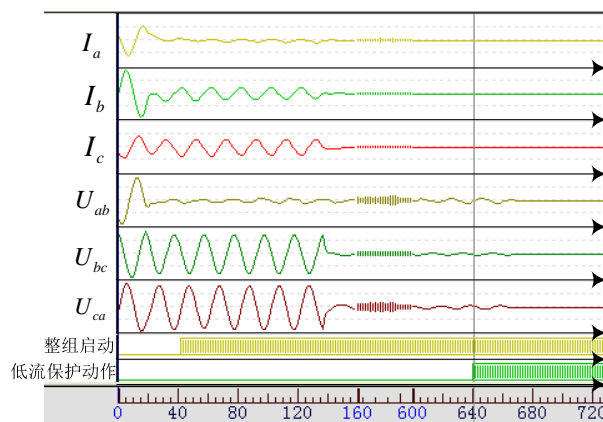


图 5 #2 变#3 电抗器保护录波

Fig.5 the Fault record of #3 reactor protection of #2 transformer

调取#2 变#3 电抗器装置的录波（如图 5），从波形上来看，装置启动时 AB 相电压出现了明显的

降低，这与主变保护的录波记录是一致的。整组启动时 A 相电流降的最多，使用波形分析软件观察，三相电流有效值分别为：A 相 0.2A，B 相 0.66A，C 相 0.8A。0ms 启动时刻 A 相电流低于低电流保护定值 0.43A。保护将延时 0.6s 动作。

608ms 时刻保护动作，此前已发展成三相故障，本应报三相故障。但是基于 2.1 节讨论可知，尽管从录波上来看低电流保护动作时三相电流都极小，均远远低于定值保护。由于该版程序的选相逻辑问题， I_a 最小几乎为零， I_b 在数值相对略大，所以以 I_a 幅值的某个倍数判断故障相，因此将三相故障误报为 AC 相故障。

等到最后流过 C 相 TA 的电流进一步变小（三相电流同时为零），保护方判处为三相故障，保护最后报出三相故障亦得到了解释。

3.3 非故障间隔电抗器保护动作行为分析

与故障间隔相邻的 #2 变 #2 电抗器的保护配置与故障间隔 #3 电抗器保护配置相同。

#2 变 #2 电抗器保护低电流保护也经延时 0.6s 动作。#2 变 #2 电抗器保护装置报文如下（已折算成相对时间）

0000ms 启动

0615ms IBC 0.04A 低流保护动作

174538ms IABC 0.00A 低流保护动作

#2 电抗器间隔本身没有故障，其保护动作存在问题，且给出了错误的故障相别，需结合录波文件作进一步分析。#2 变 #2 电抗器动作波形如图 6 所示。

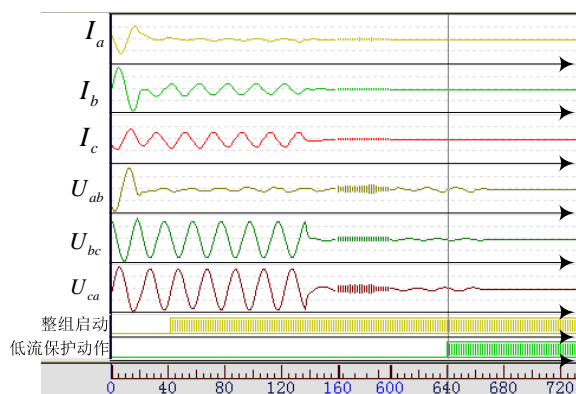


图 6 #2 变 #2 电抗器保护录波

Fig.6 the Fault record of #2 reactor protection of #2 transformer

#2 变 #2 电抗器和 #2 变 #3 电抗器并联在同一段母线上。由图 6 可知，3# 电抗器发展到相间故障阶段时，2# 电抗器保护启动，AB 相电压出现了明显的降低，其电压变化和图 5 中的 AB 相电压可以相

互印证。此时，流经 2# 电抗器的电流也在显著变小。其中 B 相电流降的最多，三相电流有效值分别为：A 相 0.4A，B 相 0.28A，C 相 0.6A。此时非故障间隔 TA 感受到电流确实已经低于 #2 变 #2 电抗器低保护定值 0.43A，因此经 0.6s 延时后非故障间隔电抗器低电流保护动作跳闸。

至此非故障间隔电抗器保护动作行为得以解释。此外，613ms 报文中出口时刻选相结果亦存在错误，其原因同样是因为源于 3.2 节提到的保护选相逻辑缺陷。

3.4 低电流保护持续动作原因分析

从图 5、图 6 波形可见，低电流保护一直保持在动作状态。从监控记录上看直到数分钟后方返回，其原因在此亦略作分析。

低电流保护采用断路器位置闭锁，考虑到电抗器保护装置的操作回路接入的是电抗器间隔的后置的断路器 322，而不是 500kV 变压器 35kV 侧的总断路器 3520。当 3# 电抗器低电流保护动作之后，3520 断路器虽成功跳开，但电抗器间隔断路器 322 断路器仍处于合位，闭锁条件不满足，因此低电流保护仍然持续动作而不能返回。此时，由于 3520 断路器已跳开，电流为 0，故装置显示出 IABC 0.00A 的报文。直到该变电站运维人员手工拉开 322 断路器后，电抗器低流保护才得以返回。低流保护持续动作至此得以解释。

此外，值得注意的是现有低流保护的位置闭锁虽然存在问题，但不能直接将电抗器断路器位置替换为 35kV 总断路器位置，以免引发 35kV 电抗器正常操作时出现其他问题。

4 结论

1) 新建 500kV 变电站选择 35kV 接线方式时，电抗器间隔应慎重选用断路器后置式配低流保护的方案。对于已采用断路器后置方式 500kV 老站，建议在 35kV 电抗器间隔改造时将干式电抗器时更换为带套管 TA 的油浸式电抗器。此时因电抗器两侧均有 TA，通过增加配置电抗器差动保护^[12-14]，保证保护动作的选择性，避免配置低流保护可能存在的问题。此外，应注意相应配置电抗器非电量保护。

2) 主变低后备保护动作时间较长，当主变低压侧发生故障由主变低后备切除时，往往主变已受到较大冲击，建议 35kV 电抗器保护动作时间按短于主变 35kV 侧低后备保护整定，即电抗器保护与

主变后备保护不仅在定值上配合,亦在时间上配合,尽快跳开主变 35kV 侧断路器,隔离故障,以减少 35kV 侧电抗器故障对 500kV 主变的冲击。

3) 采用后置式接线时,电抗器发生故障之后,流经相邻间隔电抗器尾部 TA 的电流变化规律具有一定复杂性,条件具备的 500kV 变电站可考虑增设 35kV 录波装置监控 35kV 各支路电流变化规律。

4) 继续使用电抗器低流保护的 500kV 老站,建议修改保护故障相判别逻辑,如某一相低于某个低电流门槛时被选为故障相,有效防止报相错误问题。

参考文献:

- [1] 宋继成.220kV~500kV 变电所电气接线设计[M].北京:中国电力出版社,2006.
- [2] 崔家佩,孟庆炎,陈永芳,等.电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [3] 董洁,赵凤展,杨仁刚.采用启发式策略的动态无功优化混合算法研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(5):35-40.
- [4] 汝锐锐,周步祥,林楠,等.基于 NCP 理论的光滑牛顿法在无功优化的应用[J].电力系统保护与控制,2013,41(20):99-104.
- [5] 郭香福,孟波.空心并联电抗器匝间短路故障电流及其过流保护系统[J].变压器,2008,45(11):20-22.
- [6] 张伟耀.500kV 主变低压侧电抗器保护配置方式的探讨[J].浙江电力,2011(3):19-20,30.
- [7] 李胜川,崔文军,于在明,等.500kV 变电站干式并联电抗器故障分析与建议[J].变压器,2010,47(10):69-73.
- [8] 肖辉,周珊.500 kV 万县变电站一组 35 kV 电抗器故障继电保护动作情况分析[J].继电器,2004,32(8):65-68.
- [9] 金红华,何敏,陈媛媛.一起 500kV 主变压器低压侧电抗器保护误跳事件的分析及对策[J].浙江电力,2011(10):23-25.
- [10] 黄继东,韩海伦,唐慧,等.断路器失灵事站内保护解决方案综述[J].电力系统保护与控制,2011,39(12):146-150.
- [11] 黑龙江省电力调度通信中心.现场运行人员继电保护知识实用技术与问答(110kV及以下电网)[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [12] 王业,陆于平,徐以超,等.一种用于差动保护的新型重采样方法[J].电工技术学报,2012,27(11):240-247.
- [13] 朱超,梅军,王椿丰,等.基于低延时有限冲击响应滤波器的差动保护采样率转换算法[J].电工技术学报,2013,28(10):241-248,319.
- [14] 王雪,王增平.基于广义基波功率的新型变压器主保护方案[J].电工技术学报,2012,27(12):192-198.

作者简介:

陈昊(1980-)江苏南京人,高级工程师,研究领域为输电网保护与控制。

Research on the Secondary Side Problem Caused by Breaker Rear-Wiring Pattern in Reactor Interval

Chen Hao¹, Deng Guangjing², Wang Yurong³

(1. Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Jiangsu, Nanjing, 210000; 2. Jiangsu Power Design Institute, Jiangsu, Nanjing, 211012; 3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Jiangsu, Nanjing 210096)

Abstract: Several types of wirings at the 35kV side are carried out in the practical 500kV substations. In the 500kV substation earlier put into operation, breaker rear-wiring is often used in the 35kV reactors intervals. This type of wiring can save cost to some degree. However, it can cause secondary side problems. In this paper, based on a practical instance of 35kV reactor failure in a 500kV Substation in East China, the secondary side problems, including failure of fault phase selection, misoperation of undercurrent protection and no-returning after protection operation, caused by the breaker rear-wiring is analyzed. Finally, the corresponding countermeasures is provided.

Key Words: Reactor; Breaker Rear-Wiring; Undercurrent Protection; Fault Phase Selection Logic.