TCT 式并联电抗器控制绕组匝间故障保护方案

张芬芬,郑 涛,刘连光

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要:基于对晶闸管控制变压器(TCT)式并联电抗器的本体结构和控制绕组匝间短路故障特性分析,提出一种针对其控制绕组匝间故障保护的新方案。该方案综合利用控制绕组匝间故障时网侧零序电压低、补偿绕组 零序电流大的特点,采用主判据和辅助判据相结合的方式,主判据采用零序过电流保护元件,采取两段式的 整定方式以兼顾匝间故障下保护的灵敏度和容量调节过程中的可靠性;辅助判据由网侧零序高电压闭锁元 件构成,并增加闭锁判据,保证TCT式并联电抗器在系统非全相运行、区外不对称故障、电抗器空投、容量调 节等暂态过程中保护可靠不误动。基于仿真测试结果确定了所提方案的具体整定方法,并对灵敏度进行了校 验,分析计算的结果证明了所提方案的可行性和有效性。

关键词:晶闸管控制变压器式并联电抗器;控制绕组;匝间故障;保护方案;暂态特性;灵敏度分析 中图分类号:TM 472;TM 772 文献标识码:A DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.020

0 引言

采用并联电抗器补偿输配电系统长线路的容性 无功是常用方法。随着全球能源互联战略的提出, 一方面,采用超/特高压技术建设远距离、大功率输 电线路的需求越来越大^[1-2];另一方面,新能源发电 的大规模集中接入会使得超/特高压输电线路上潮 流变化更加频繁,加剧了无功电压控制的难度。现有 的固定电抗器已难以满足大电网容性无功补偿的需 求,而补偿容量可控的电抗器将成为有效解决超/特 高压输电系统中无功与电压控制难题的关键技术之 一^[3-5]。其中,晶闸管控制变压器 TCT (Thyristor-Controlled Transformer)式并联电抗器是一种新型的 可控电抗器,其兼具分级式可控电抗器响应速度快^[6] 和磁控式可控电抗器容量平滑可调^[7]的优点,是未来 超/特高压电网并联电抗器技术可能的发展方向^[8]。

TCT 式并联电抗器本质上属于高漏抗变压器, 其漏抗可达 100% 额定阻抗,其铁芯具有较大的过 载能力,不易饱和。采用 TCT 式并联电抗器来解决 超/特高压输电系统的无功电压问题比其他电抗器 更具优势。匝间故障保护是可控电抗器保护的重点 和难点。与固定电抗器、常规电力变压器相比,TCT式 并联电抗器的结构复杂,其高漏抗的设计使控制绕 组匝间故障时的故障特征不明显,且运行中需根据 系统无功需求调节工作容量,这些结构和工作原理 上的特殊性使得 TCT 式并联电抗器控制绕组匝间 故障在保护配置上面临更多的难题。目前针对可控 并联电抗器保护方案的研究主要集中于磁控式^[9-11] 和分级式^[12-14]电抗器,而对 TCT 式并联电抗器的研

收稿日期:2016-05-20;修回日期:2017-03-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677069)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677069)

究较少,其控制绕组匝间短路故障保护是尚未解决 的难题之一,故有必要对其展开研究。文献[14]针对 分级式可控并联电抗器,提出用控制绕组自产零序 过流保护反映控制绕组匝间短路故障,但其存在灵 敏性低、动作慢等缺点。固定电抗器匝间短路一般采 用由电抗器首端自产零序电流、零序电压组成的零 序功率方向的保护方案^[15];而 TCT 式并联电抗器发 生控制绕组匝间故障时,因补偿绕组采用三角形连 接形式分流了大部分的零序电流,导致网侧零序功 率方向保护灵敏度不足。文献[16]给出了 TCT 式并 联电抗器的整体保护配置方案,针对控制绕组匝间 故障,指出其是因为高漏抗的结构导致基于磁平衡 的纵联电流差动保护灵敏度不足。

综上所述,考虑到 TCT 式并联电抗器的特殊结构 和运行方式,目前尚无针对其控制绕组匝间故障的 有效保护方案,本文从不同工况下的电气量出发,提 出在控制绕组匝间故障情况下,综合利用零序电压、 零序电流等电气量特征,采取主、辅判据相结合的方 式,能有效解决 TCT 式并联电抗器控制绕组匝间故 障保护灵敏度不足的问题。

1 TCT 式并联电抗器控制绕组匝间故障特征及其他工况影响分析

1.1 TCT 式并联电抗器的结构及参数

典型的 TCT 式并联电抗器结构如图 1 所示,其 由网侧绕组、控制绕组和补偿绕组构成。网侧绕组连 接高压输电系统,末端经中性点直接接地(用作母线 高抗)或经小电抗接地(用作线路高抗);控制绕组通 过反并联的晶闸管阀组构成相控式交流调压电路^[17], 通过调节晶闸管触发角 α,改变一个周期内控制绕组 电流的平均值,从而平滑地调节电抗器的工作容量; 补偿绕组采用△连接,并配有滤波支路,以减小正常 运行时注入网侧的谐波。



Fig.1 Body structure of TCT shunt reactor

基于 35 kV TCT 式并联电抗器低压物理模型, 在 MATLAB/Simulink 中搭建了精确仿真模型,其参 数如下:额定频率为 50 Hz, 网侧绕组、控制绕组、补 偿绕组额定相电压分别为 35/√3、6、6 kV, 网侧绕 组、控制绕组、补偿绕组单相额定容量分别为 10、10、 3 Mvar, 网侧绕组基波电流、控制绕组基波电流、补 偿绕组角内基波电流分别为 495、1667、500 A, 网侧 绕组-控制绕组、网侧绕组-补偿绕组、控制绕组-补 偿绕组额定短路阻抗电压分别为 96%、60%、35%。

1.2 控制绕组匝间故障

TCT 式并联电抗器在满容量运行方式下控制绕 组某相发生匝间故障时的零序等效电路如图 2 所 示。图中, X_{so} 为等值系统零序电抗; X_{1} 、 X_{I} 、 X_{II} 分别 为 TCT 式并联电抗器网侧绕组、控制绕组、补偿绕 组的漏抗; X_{II} 为励磁电抗; X_{k} 为匝间故障等效附加 绕组电抗; U_{0} 为故障后零序电压相量。



图 2 控制绕组匝间故障零序等效电路 Fig.2 Zero-sequence equivalent circuit of control winding inter-turn fault

控制绕组匝间短路故障状态下,零序电源位于 电抗器内部故障相上,根据图2可知,网侧绕组、控 制绕组、补偿绕组、励磁支路并联,对总的零序电流 形成分流。由35kV TCT式并联电抗器低压物理模 型参数设定可知,网侧绕组、控制绕组、补偿绕组的 额定漏抗分别为0.605、0.355、-0.005 p.u.。忽略励磁 支路上的电流,网侧绕组分流最小,控制绕组次之, 补偿绕组分流最大,宜采用补偿绕组零序电流量来反 映控制绕组匝间故障。另外,网侧零序电流很小,且 系统零序电抗不大,故电抗器安装母线处电压互感 器检测到的零序电压(以下简称"网侧零序电压") 很小,这也是不能采用常规变压器零序功率方向保 护来反映控制绕组匝间故障的原因之一。概括而言, 控制绕组匝间短路故障特征表现为:补偿绕组零序电 流明显增大;网侧零序电压很小;网侧绕组零序电流、 控制绕组零序电流较小。

图 3 给出了 TCT 式并联电抗器工作在 40% 容 量下,控制绕组 A 相发生 50% 匝间故障时各绕组电 气量仿真波形(故障时刻设置在 3 s),各电气量均采 用标幺值,后同。由图 3 可知,故障后网侧零序电压、 零序电流以及控制绕组零序电流均很小,只有补偿 绕组电流较大,验证了上述理论分析结果的正确性。 由上述分析可得,可用补偿绕组零序电流构成控制 绕组匝间短路故障保护的主判据。由于补偿绕组正 常工作时流过多次谐波电流,为提高保护灵敏度和 可靠性,宜提取补偿绕组零序电流工频分量。



故障时各电气量波形

Fig.3 Voltage and current waveforms during 50% inter-turn fault of phase-A control winding, with 40% capacity

1.3 系统非全相运行或发生不对称接地故障

用作母线高抗的 TCT 式并联电抗器在系统非全 相运行或发生不对称接地故障时, 网侧三相电压的 非对称性可能导致控制绕组晶闸管阀组触发紊乱, 各绕组电气量均会呈现非对称的运行状态。TCT 式 并联电抗器在满容量运行方式下, 当系统发生不对 称接地故障时的零序等效电路如图 4 所示。此时零

136



图 4 区外不对称接地故障零序等效电路 Fig.4 Zero-sequence equivalent circuit of out-zone asymmetric grounding fault

序电压源位于电抗器外部, 网侧电压互感器检测到 较大的零序电压, 电抗器网侧绕组、控制绕组、补偿 绕组均产生较大的零序电流。与 1.2 节控制绕组匝 间短路故障特性相比, 其最明显的区别在于网侧零 序电压的大小: 控制绕组匝间短路故障对网侧电压 的对称性破坏很小, 网侧零序电压很小; 系统非全相 运行或发生不对称接地故障时网侧绕组三相电压将 出现明显的不对称, 网侧零序电压较大。故为了防 止系统非全相运行及发生不对称接地故障情况下保 护主判据误判, 宜采用零序高电压闭锁元件作为辅 助判据, 实现上述工况下零序电流保护的闭锁。

图 5 给出了 TCT 式并联电抗器工作在 40% 容量下,系统近端线路 A 相发生接地故障情况下网侧 零序电压的波形图(故障时刻设置在 3 s)。由图 5 可 见,此时零序电压数值比控制绕组匝间故障时大很 多,进一步验证了所提零序高电压闭锁的可行性。



网侧零序电压波形 Fig.5 Grid-side zero-sequence voltage during out-zone

phase-A grounding fault, with 40% capacity

1.4 电抗器空投

TCT式并联电抗器投入运行时,网侧电压突变有 可能产生励磁涌流,从而在补偿绕组中产生幅值较 大的零序电流,易引起主判据误判。若通过抬高保护 定值来躲过励磁涌流,则很可能会导致控制绕组匝 间故障时保护拒动,降低了保护的灵敏度,且由于此 时网侧零序电压很小,零序高电压闭锁的辅助判据 也失效,因此必须增加电抗器空投闭锁判据。通常在 进行 TCT 式并联电抗器空投操作时,首先将控制绕 组晶闸管闭锁,其次断开补偿绕组的 5 次、7 次滤波 支路,最后在 TCT 式并联电抗器空投时,其结构已与常 规 Y-△电力变压器相类似,故其空投操作引起的暂 态过程与常规电力变压器空载合闸过程相似。因此 TCT 式并联电抗器空投判据可借鉴传统变压器涌流 闭锁判据^[18-20],如二次谐波制动、间断角原理等,本 文不再赘述。

1.5 容量调节

为限制系统工频过电压、操作过电压以及抑制 故障后潜供电流,TCT式并联电抗器需要频繁地进 行容量调节。考虑到容量调节过程中三相控制系统 的误差以及晶闸管触发脉冲的延时,各绕组运行状 态可能会出现暂态不对称,导致基于补偿绕组零序 电流的主判据误动,故TCT式并联电抗器的保护配 置必须考虑到其容量调节暂态过程的影响,这是传 统固定电抗器或者变压器保护不曾面临的新问题, 也是TCT式并联电抗器保护研究的难点。

在电抗器阀控系统接收到容量调节指令的瞬间,处于导通状态的晶闸管仍将按照原触发角触发状态导通;而处在关断状态的晶闸管则将在收到触发信号之后,以新的触发角触发状态导通。换言之, 在阀控系统改变触发角设定值后的一段时间内,6 个晶闸管的触发角不再相同,导致控制绕组三相电流不再对称,这种不对称通过磁通耦合传递到网侧绕组和补偿绕组电流中,所以网侧绕组、补偿绕组也 会出现较大的零序电流,进而造成主判据误判。此 外,容量调节过程中网侧零序电压很小会导致零序 高电压闭锁辅助判据也失效。

图 6 给出了容量 10 % 至 90 % 阶跃调节以及 90 % 至 10 % 阶跃调节时补偿绕组零序电流工频分 量的波形,容量调节发生在 1.5 s 时刻。仿真结果显 示容量调节的暂态过程中补偿绕组零序电流工频分 量数值较大,甚至超过控制绕组匝间故障情况下的 电流水平(见图 3),必然会导致主判据失效。



Fig.6 Current waveforms during capacity adjustment 为防止工作容量调节过程中保护误动,同时兼

顾匝间故障情况下保护的灵敏度,建议主判据采用 两段式整定方法。固定容量运行方式下采用低定值 的灵敏Ⅰ段保护,保护定值*I*stl 按躲过正常工作下补 偿绕组的不平衡电流整定,保证保护的灵敏度;在阀 控系统收到容量调节指令的瞬间,启用定值较高的 不灵敏Ⅱ段保护,避免保护误动;经一定延时后再自 动切换到灵敏Ⅰ段零序过电流保护。不灵敏Ⅱ 段保 护定值*I*st2 按照躲过容量调节工况下补偿绕组出现 的最大不平衡电流整定,Ⅱ段保护投入时间按照躲 过容量调节暂态过程最大持续时间整定。

2 控制绕组匝间保护方案及其整定方法

综合 1.2 至 1.5 节的分析,提出 TCT 式并联电 抗器控制绕组匝间故障保护的新方案,新方案采用 主判据和辅助判据配合的形式:主判据采用零序过 电流保护元件,检测补偿绕组零序电流工频分量的 有效值,当容量不变时将之与灵敏 I 段保护的整定 值比较,若超过整定值则输出动作指令,在容量调节 过程中将之与不灵敏 I 段保护的整定值比较,若超 过整定值则输出动作指令;辅助判据由区外异常闭锁 判据和空投闭锁判据组成,其中区外异常闭锁判据 用来检测零序电压并将之与整定值比较,若超过整 定值则输出闭锁指令。当主判据输出动作指令,且辅 助判据无闭锁指令输出时,延时跳开电抗器网侧开关。

考虑到 TCT 式并联电抗器安装处三相电压可 能存在的不平衡,以及由设备制造误差造成的电抗 器三相漏抗参数的差异均会导致正常运行时补偿绕 组产生不平衡电流,故在主判据灵敏Ⅰ段保护整定时 需考虑上述工况的影响。为了防止容量调节暂态过 程对保护造成影响,不灵敏Ⅱ段保护整定时需躲过容 量调节暂态过程中补偿绕组最大不平衡电流,不灵敏 Ⅱ段保护投入时间整定需躲过容量调节暂态过程最 长持续时间。

考虑到 5% 的设备制造误差,表 1 给出了 35 kV TCT 式并联电抗器仿真模型在不同工作容量下补偿 绕组零序电流工频分量的有效值(标幺值,后同),其 中最大不平衡电流 I_{0max1} =0.0804 p.u.。为了躲过其影 响,灵敏 I 段保护定值设定为 I_{set1} = $K_{rel1}I_{0max1}$,灵敏 I 段保护可靠系数 K_{rel1} 取为 1.2,则 I_{set1} =1.2×0.0804≈ 0.1 I_{r3} ,其中 I_{r3} 为补偿绕组额定电流。表 2 给出了电 抗器容量调节工况下补偿绕组零序电流工频分量的 有效值及暂态过程持续时间,其中最大不平衡电流 I_{0max2} =0.7583 p.u.。为了躲过其影响,不灵敏 II 段保护 定值设定为 I_{set2} = $K_{rel2}I_{0max2}$,不灵敏 II 段保护可靠系数 K_{rel2} 取为 1.2,则 I_{set2} =1.2×0.7583≈0.9 I_{r3} ,投入不灵 敏 II 段保护可靠系数时间可设定为 t_{s} =200 ms。

至此,可给出主判据的动作方程。电抗器固定容

| 表 1 | ŧ | 目抗器参数 5 | %不平 | 衡日 | 时补偿绕组不- | 平衡电流 |
|-------|---|------------|---------|----|--------------|-----------|
| Table | 1 | Unbalanced | current | of | compensation | windings, |

| with | 5% | unbalance | of | reactor | parameter | |
|------|----|-----------|----|---------|-----------|--|
|------|----|-----------|----|---------|-----------|--|

| 不亚佈博坦 | 补偿绕组零序电流工频分量 | | | | |
|-----------------|--------------|--------|--------|--------|--|
| 小丁供用几 | 10%容量 | 40%容量 | 70%容量 | 100%容量 | |
| 网侧绕组漏抗 5%不平衡 | 0.0031 | 0.0270 | 0.0555 | 0.0707 | |
| 控制绕组漏抗 5%不平衡 | 0.0055 | 0.0313 | 0.0262 | 0.0804 | |
| 补偿绕组漏抗 5%不平衡 | 0.0091 | 0.0142 | 0.0197 | 0.0289 | |

表 2 容量调节暂态过程中补偿绕组零序电流 Table 2 Zero-sequence current of compensation

| winding | during | capacity | adjustment |
|---------|--------|----------|------------|
| 应且阳井斗和 | 补偿约 | 尧组零序 | 暂态过程持续 |

| 容量调节过程 | 补偿绕组零序 电流工频分量 | 暂态过程持续 时间 $\Delta t / ms$ |
|---------|------------------|------------------------------|
| 10%至40% | 0.3038 | 98.6964 |
| 10%至70% | 0.5526 | 158.7035 |
| 10%至90% | 0.7556 | 61.4794 |
| 40%至10% | 0.2287 | 22.8540 |
| 40%至70% | 0.1444 | 22.8136 |
| 40%至90% | 0.5276 | 54.3118 |
| 70%至10% | 0.4039 | 22.8230 |
| 70%至40% | 0.2053 | 20.6811 |
| 70%至90% | 0.3481 | 28.9080 |
| 90%至10% | 0.7583 | 30.7695 |
| 90%至40% | 0.6106 | 97.5362 |
| 90%至70% | 0.1596 | 17.2212 |

量运行时 I 段保护投入,动作方程为:

$$3I_{0III} > I_{set1}$$
 (1)

其中,3*I*₀Ⅲ 为补偿绕组零序电流工频分量有效值。电 抗器容量调节暂态过程中Ⅱ段保护投入,动作方程为:

$$3I_{0II} > I_{set2}$$
 (2)

对于区外异常闭锁判据,零序高电压闭锁判据 定值按照躲过正常工况下线路电压互感器最大不平 衡电压整定,根据经验,取 U_{st}=0.01 U_{n1},其中 U_{n1} 为 电抗器网侧额定电压,闭锁方程为:

$$3 U_{01} > U_{set}$$
 (3)

其中,3U01为网侧零序电压。

综上所述,本文设计的保护方案动作逻辑图如 图 7 所示。



图 7 控制绕组匝间保护逻辑图 Fig.7 Protection logic of control winding inter-turn fault

3 匝间保护方案灵敏度分析

3.1 不同运行容量下匝间保护的灵敏度

基于 35 kV TCT 式并联电抗器仿真模型,对容 量固定运行方式下电抗器发生控制绕组匝间故障进 行了多组仿真测试,仿真结果如表 3 所示。其中,灵 敏度计算方法为:K_{sel}=3I₀₀/I_{sel}。仿真结果表明,在控 制绕组发生 20%及以上匝间故障时,本文所提方案 有一定灵敏性;在小容量工作方式下保护灵敏度较 高,5%及以上匝间故障均能被保护检测到,而大容 量工作方式下发生小匝比短路故障时保护灵敏度稍 显不足。这是因为工作容量越大,控制绕组匝间故障 对三相电流对称性的破坏性相对而言越小,故障特 征越不明显。

表 3 不同容量下匝间保护灵敏度 Table 3 Sensitivity of inter-turn fault protection for different capacities

| 容量/% | 短路 匝比/% | 补偿绕组零序 电流工频分量 | 保护 是否动作 | 灵敏度 |
|------|------------|------------------|------------|--------|
| | 5 | 0.3766 | 是 | 3.766 |
| | 10 | 0.6716 | 是 | 6.716 |
| 10 | 15 | 0.9261 | 是 | 9.261 |
| | 20 | 1.1211 | 是 | 11.211 |
| | 50 | 2.0639 | 是 | 20.639 |
| | 5 | 0.3035 | 是 | 3.035 |
| | 10 | 0.5263 | 是 | 5.263 |
| 40 | 15 | 0.7191 | 是 | 7.191 |
| | 20 | 0.8862 | 是 | 8.862 |
| | 50 | 1.9049 | 是 | 19.049 |
| | 5 | 0.1675 | 是 | 1.675 |
| | 10 | 0.2874 | 是 | 2.874 |
| 70 | 15 | 0.4165 | 是 | 4.165 |
| | 20 | 0.5529 | 是 | 5.529 |
| | 50 | 1.3640 | 是 | 13.640 |
| | 5 | 0.0331 | 否 | — |
| | 10 | 0.0961 | 否 | — |
| 90 | 15 | 0.1419 | 是 | 1.419 |
| | 20 | 0.1843 | 是 | 1.843 |
| | 50 | 0.4490 | 是 | 4.490 |

3.2 容量调节方式下匝间保护灵敏度

在容量调节过程中控制绕组也有发生匝间故障 的可能性,为验证所提方案在此情况下的灵敏性,对 容量调节期间控制绕组发生匝间故障的工况进行了 仿真测试,仿真结果如表4所示。其中,灵敏度计算 方法为:Ksen2=3I011/Iset2。仿真结果表明,本文所提匝 间故障保护方案在容量调节暂态过程中仍具有一定 的灵敏性,但目标容量较大时会出现保护灵敏度不 足的情况。例如,40%至90%和70%至90%容量 调节过程中发生50%及以下的匝间故障时,所提方 案灵敏度不足,这与表3中反映出的电抗器在大容 量工作方式下发生匝间短路时保护灵敏度会降低的 规律相一致。另外,目标容量均为90%而调节过程 不同时,保护灵敏度也会呈现出一定差异。例如,10%

表 4 容量调节过程中保护灵敏度 Table 4 Protection sensitivity during

| canacity | adjustment |
|----------|-------------|
| Capacity | aujustinent |

| The state of the s | | | | | | | |
|--|------------|------------------|------------|--------|--|--|--|
| 容量 调节过程 | 短路 匝比/% | 补偿绕组零序 电流工频分量 | 保护 是否动作 | 灵敏度 | | | |
| 1007 五 400 | 20 | 1.0449 | 是 | 1.1610 | | | |
| 10%主40% | 50 | 1.8627 | 是 | 2.0697 | | | |
| 100(五700) | 20 | 1.0229 | 是 | 1.1366 | | | |
| 10%主70% | 50 | 1.605 5 | 是 | 1.7839 | | | |
| 100(至 000 | 20 | 0.7004 | 否 | — | | | |
| 10%主90% | 50 | 1.0246 | 是 | 1.1384 | | | |
| 4004至1004 | 20 | 1.1709 | 是 | 1.3010 | | | |
| 40%主10% | 50 | 2.4817 | 是 | 2.7574 | | | |
| 4001至7001 | 20 | 0.7419 | 否 | — | | | |
| 40%主70% | 50 | 1.6112 | 是 | 1.7902 | | | |
| 4004至0004 | 20 | 0.5631 | 否 | — | | | |
| 40%主90% | 50 | 0.8990 | 否 | — | | | |
| 700(至100) | 20 | 1.2764 | 是 | 1.4182 | | | |
| 70%主10% | 50 | 2.7687 | 是 | 3.0763 | | | |
| 7001 五 4001 | 20 | 0.9947 | 是 | 1.1052 | | | |
| 70%主40% | 50 | 2.1744 | 是 | 2.4160 | | | |
| 7001至000 | 20 | 0.4200 | 否 | — | | | |
| 70%主90% | 50 | 0.6845 | 否 | _ | | | |
| 0004至1004 | 20 | 1.5127 | 是 | 1.6808 | | | |
| 90%主10% | 50 | 2.7538 | 是 | 3.0598 | | | |
| 000%至4000 | 20 | 1.1092 | 是 | 1.2324 | | | |
| 90%主40% | 50 | 4.9147 | 是 | 5.4608 | | | |
| 0004至7004 | 20 | 0.6694 | 否 | _ | | | |
| 90%主 10% | 50 | 1.6268 | 是 | 1.8076 | | | |

至 90% 和 40% 至 90% 容量调节过程中控制绕组均 发生 50% 匝间故障时, 10% 至 90% 容量调节工况 下保护能可靠动作,但 40% 至 90% 容量调节工况下 保护灵敏度不足。笔者认为,这与电抗器容量调节暂 态特性有一定联系,起始容量和目标容量的不同都会 影响其暂态特性,保护灵敏度并不简单取决于短路 匝比这一因素,同时与容量调节的具体暂态过程密 切相关,详尽的物理解释有待更深入地分析。

4 结论

a. 本文结合 TCT 式并联电抗器的特点,分析了 控制绕组匝间故障下的电气量特征,并对比分析了 系统非全相运行及区外线路发生不对称故障、电抗 器空投、容量调节暂态过程中电气量的异同,综合利 用网侧零序电压以及补偿绕组零序电流工频分量, 采用主判据和辅助判据结合的方式,兼顾保护的灵 敏度和可靠性,提出了 TCT 式并联电抗器控制绕组 匝间故障保护的新方案。

b. 为防止容量调节过程中保护误动,主判据采 取两段式的整定方式以兼顾匝间故障下保护的灵敏 度和容量调节过程中的可靠性,电抗器固定容量运 行方式下投入低定值高灵敏Ⅰ段保护,容量调节的暂 态过程中启用高定值低灵敏Ⅱ段保护。

c. 辅助判据是利用网侧零序电压构成区外异常

闭锁判据,并增加空投闭锁判据,保证在系统非全相运行或发生不对称故障、电抗器空投等过程中保护可靠、不误动。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 构建全球能源互联网推动能源与环境协调发展[J]. 中国电力企业管理,2014(12):14-17.
- [2] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术,2013,37(3):1-8.

LIU Zhenya. Innovation of UHVAC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013, 37(3):1-8.

- [3] 柳轶彬,田铭兴,尹健宁.变压器式可控电抗器的单绕组调节模式及谐波电流优化[J].电力自动化设备,2015,35(7):74-82.
 LIU Yibin,TIAN Mingxing,YIN Jianning. Single-winding regulating mode and harmonic current optimization of controllable reactor of transformer type[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(7):74-82.
- [4] 田铭兴,杨秀川,杨雪淞. 基于 MATLAB 多绕组变压器模型的磁 饱和式可控电抗器仿真建模方法[J]. 电力自动化设备,2014,34 (3):78-81.

TIAN Mingxing, YANG Xiuchuan, YANG Xuesong. Modeling of magnetically saturation controllable reactor based on multiwinding transformer models of MATLAB[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3):78-81.

[5]田铭兴,杨雪凇,顾生杰,等.基于 MATLAB 的磁饱和式可控电 抗器的仿真模型参数及过渡时间分析[J].电力自动化设备,2013, 33(6):47-51.

TIAN Mingxing, YANG Xuesong, GU Shengjie, et al. Analysis of simulation model parameters and transition time based on MATLAB for magnetically-saturated controllable reactor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6):47-51.

[6] 郑涛,赵彦杰. 超/特高压可控并联电抗器关键技术综述[J]. 电 力系统自动化,2014,38(7):127-135.

ZHENG Tao, ZHAO Yanjie. Overview of key techniques of EHV/UHV controllable shunt reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7):127-135.

- [7] 袁剑,田翠华,田成,等. 新型磁控电抗器快速响应技术[J]. 电力 自动化设备,2016,36(5):166-170.
 YUAN Jian,TIAN Cuihua,TIAN Cheng, et al. Fast response technology of MCR[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(5):166-170.
- [8] 刘洋,贾跟卯,张振环,等. 超/特高压 TCT 式可控并联电抗器结构及仿真研究[J]. 智能电网,2014,2(12):36-41.
 LIU Yang,JIA Genmao,ZHANG Zhenhuan, et al. Structure and simulation study of EHV/UHV TCT type controllable shunt reactor[J]. Smart Grid,2014,2(12):36-41.
- [9] ZHENG T,ZHAO Y J,JIN Y,et al. Design and analysis on the turn-to-turn fault protection scheme for the control winding of magnetically controlled shunt reactor [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2):967-975.
- [10] 熊蕙,程晓,文继锋,等. 超高压输电系统中磁可控电抗器保护 配置与实现[J]. 江苏电机工程,2014,33(2):37-39.
 XIONG Hui,CHENG Xiao,WEN Jifeng,et al. Magnetically controlled reactor protection in HVAC transmission system[J].
 Jiangsu Electrical Engineering,2014,33(2):37-39.
- [11] 郑涛,赵彦杰,金颖. 特高压磁控式并联电抗器保护配置方案及 其性能分析[J]. 电网技术,2014,38(5):1396-1401.

ZHENG Tao, ZHAO Yanjie, JIN Ying. Research on protective configuration for a UHV magnetically controlled shunt reactor [J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1396-1401.

- [12] 姚晴林,李瑞生,粟小华,等. 分级式高压可控并联电抗器微机 保护配置及原理分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(21):58-65. YAO Qinglin,LI Ruisheng,SU Xiaohua, et al. Configuration and principle analysis of microcomputer protection for classified high voltage controllable shunt reactor[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(21):58-65.
- [13] 廖敏, 昃萌. 分级可控并联电抗器的控制策略及保护配置[J]. 电力系统自动化,2010(15):56-59.
 LIAO Min, ZE Meng. Control strategy and protection configuration for step controlled shunt reactor [J]. Automation of Electric Power Systems,2010(15):56-59.
- [14] 屠黎明,苏毅,于坤山,等. 微机可控高压并联电抗器保护的研制[J]. 电力系统自动化,2007,31(24):94-98.
 TU Liming,SU Yi,YU Kunshan,et al. Development of microcomputer protection for a controllable highvoltage shunt reactor[J].
 Automation of Electric Power Systems,2007,31(24):94-98.
- [15] 郭晓红,窦加强. 500 kV 并联电抗器保护配置及选型分析[J]. 电力自动化设备,1999,19(5):34-36.
 GUO Xiaohong,DOU Jiaqiang. Analysis of 500 kV collateral reactor protection arrangement and type selection[J]. Electric Power Automation Equipment,1999,19(5):34-36.
- [16] 郑涛,赵彦杰,金颖,等. 晶闸管控制变压器式可控并联电抗器 本体保护方案[J]. 电网技术,2014,38(9):2538-2543.
 ZHENG Tao,ZHAO Yanjie,JIN Ying,et al. Research on protection scheme for thyristor controlled transformer controllable shunt reactor[J]. Power System Technology,2014,38(9):2538-2543.
- [17] 王兆安. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [18] 邱文征,陈德树.两种励磁涌流二次谐波制动判据的比较[J]. 电力自动化设备,1998,18(3):8-9.
 QIU Wenzheng,CHEN Deshu. Comparison between two restrained criteria of the magnetizing inrush 2nd harmonic[J]. Electric Power Automation Equipment,1998,18(3):8-9.
- [19] 李文文,崔新艺,陶惠良.利用间断角原理和数字式变压器保护的研究[J].电力自动化设备,1997,17(1):25-29.
 LI Wenwen,CUI Xinyi,TAO Huiliang. The study of digital transformer protection restrained by dead angle[J]. Electric Power Automation Equipment, 1997, 17(1):25-29.
- [20] 张雪松,何奔腾.变压器和应涌流对继电保护影响的分析[J]. 中国电机工程学报,2006,26(14):12-17.
 ZHANG Xuesong,HE Benteng. Influence of sympathetic interaction between transformers on relay protection[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(14):12-17.

作者简介:



张芬芬(1991—),女,山东枣庄人,硕士研 究生,研究方向为新能源电力系统保护与控 制(**E-mail**:zhangfenfen91@126.com);

郑 涛(1975—),男,山东济南人,副教授,博士,研究方向为新能源电力系统保护与控制等(E-mail:zhengtao_sf@126.com);

张芬芬

刘连光(1954—),男,吉林汪清人,教授, 博士研究生导师,研究方向为电网安全运行与

灾变控制、电力系统规划等(E-mail:liulianguang@ncepu.edu.cn)。

140

Protection schemes for control winding inter-turn faults of

TCT-type shunt reactor

ZHANG Fenfen, ZHEGN Tao, LIU Lianguang

(State Key Laboratory of New Energy Power System,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The body structure and control winding inter-turn fault characteristics of TCT(Thyristor-Controlled Transformer)-type shunt reactor are analyzed and a protection scheme of main criterion combined with auxiliary criterion is proposed according to the fault characteristics of low grid-side zero-sequence voltage and large compensation winding zero-sequence current. The main criterion adopts the zero-sequence over-current protection element with two-segment setting mode to guarantee the sensitivity of inter-turn fault protection and the reliability of capacity adjustment. The auxiliary criterion adopts the high grid-side zero-sequence voltage blocking element with additional blocking criterion to guarantee the reliable operation of TCT shunt reactor protection during the transient processes of system incomplete-phase operation, out-zone asymmetric fault, reactor switching and capacity adjustment. Its setting principles are determined based on the simulative and experimental results, its sensitivity is checked, and its feasibility and effectiveness are verified by the analytical and calculative results.

Key words: TCT-type shunt reactor; control windings; turn-to-turn faults; protection schemes; transient characteristics: sensitivity analysis

(上接第 134 页 continued from page 134)

Impact of open-circuit fault on zero-sequence over-current protection and improved protection scheme

LIU Yadong¹, SUN Jiwei², YANG Guosheng¹, ZHOU Zexin¹, GUO Yanfeng³, NIU Yanli³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Dispatching & Control Center of North China

Grid Co., Ltd., Beijing 100053, China; 3. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: In grid operation, it is found that the open-circuit fault may cause the zero-sequence over-current protections of adjacent transmission lines to function improperly, especially the multi-circuit transmission line with heavy load. The simultaneous misoperation of the zero-sequence over-current end-zone protections for the adjacent transmission lines in the same cross section may seriously expand the incident. The open-circuit fault of heavily-loaded transmission line and its effect on the zero-sequence over-current protection are studied by theoretical analysis and simulation, an improved protection scheme suitable for the open-circuit fault of transmission line is proposed, and its effectiveness is verified by the RTDS test for a real protection device. Key words: relay protection; zero-sequence over-current protection; heavy load; open-circuit fault; fault

characteristic