

双芯对称离散型可控移相器对纵联保护的影响分析

陈新¹, 姚旭¹, 康小宁²

(1. 甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 晶闸管控制的移相器 (Thyristor Controlled Phase Shifter, TCPS) 通过调整移相角实现电网潮流分布的控制, 可有效改善电网潮流分布, 提高电网运行经济性。但移相器的应用改变了电网结构和相间耦合关系, 当常规纵联保护直接应用于含有移相器的线路时, 需考虑移相因素对差动电流的影响以及采用合适的差动电流计算方法, 同时需考虑互感器的安装位置的选取, 而纵联方向保护方向元件是否受影响也需要做进一步的分析。针对安装了 TCPS 的输电线路纵联保护进行了分析和仿真研究, 建立了相应的电磁仿真模型, 在此基础上分析了互感器安装于不同位置时, 常规方向元件、差动元件的动作特性, 并提出了几种可能的差动电流计算方法, 仿真分析了纵联保护在含移相器线路的适应性。研究表明, 移相器的接入对于纵联方向保护的方向元件没有影响, 但对常规电流差动保护影响较大, 纵联保护应用中宜使用线路侧互感器实现。

关键词: 双芯对称离散型可控移相器; 电流差动保护; 方向元件; 纵联保护; 柔性输电

Research on the effects of TCPS on pilot protection

CHEN Xin¹, YAO Xu¹, KANG Xiao-ning²

(1. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730030, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Thyristor Controlled Phase Shifter (TCPS) can control the power flow distribution by adjusting phase-shifting angle, and enhance the economy of power grid. But the application of TCPS changes the structure of power grid and the coupling relationship between phases. In this case, some key issues have to be considered while using pilot protection on transmission lines with TCPS, which include the installation of current transformer, the effects of phase shift angle on differential current calculation and the characteristics of traditional direction component. This paper introduces the principle of TCPS and builds a simulation model in PSCAD, and analyzes characteristics of the directional component and differential component considering the transmission lines with TCPS. The simulation results show that the directional pilot protection can be applied in transmission lines with TCPS, but for the current differential protection, it is best to use current transformers installed at the line side.

Key words: TCPS; differential protection; directional component; pilot protection; FACTS

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0121-05

0 引言

综合型 FACTS 装置 TCPS, 也称为晶闸管控制的移相变压器, 通过控制线路移相角能有效地调节电网潮流分布, 提高电网运行经济性, 有巨大的应用前景。但 TCPS 的接入改变了常规输电线路的结构和相间耦合关系, 作为高压线路主保护的纵联保护能否应用并可靠工作是工程实施需要解决的重要问题之一。因此, 研究和分析 TCPS 对纵联保护的影响对电网安全运行具有重要意义。

作为一种新型的 FACTS 设备, 目前的研究主要集中在控制策略的研究^[1-10], TCPS 对保护的影响分

析目前少见报道。本文首先分析了 TCPS 的工作原理, 在此基础上建立了含有 TCPS 的电磁暂态仿真模型。然后根据仿真数据分析了各种因素对纵联保护的影响, 最后提出了对纵联保护应用于 TCPS 工程的建议。

1 可控移相器工作原理及电磁暂态建模

1.1 双芯对称离散型移相器电路结构及移相原理

移相器的工作原理有多种, 其中双芯对称离散型可控移相器 TCPS 由 Guth G 等学者于 1981 年提出^[1], 其拓扑结构如图 1(a)所示, 本文的研究主要针对此种移相器展开。TCPS 移相器由并联变压器

(ET)、串联变压器(BT)和电力电子开关按照一定的连接方式构成。ET的原边绕组记为E1;而其副边绕组被分为3段,分别记为E2、E3、E4,其匝数比之间的数值关系为1:3:9。利用电力电子开关的通断控制不同极性副边绕组的串联获得不同的组态,实现移相器档位的切换。图1(b)是组态-5的示意图,其中电力电子开关1、4、5、8、10、11处于通态,其余开关处于关断状态,ET副边接入电路中,所以该组态对应匝数比为1+3-9=-5。其他组态-13~+13一共27个档位,实现方法类似。移相角的调节依靠调整ET副边的匝数比实现,移相范围 $-25^{\circ}+25^{\circ}$,每档相差约 2° [1]。

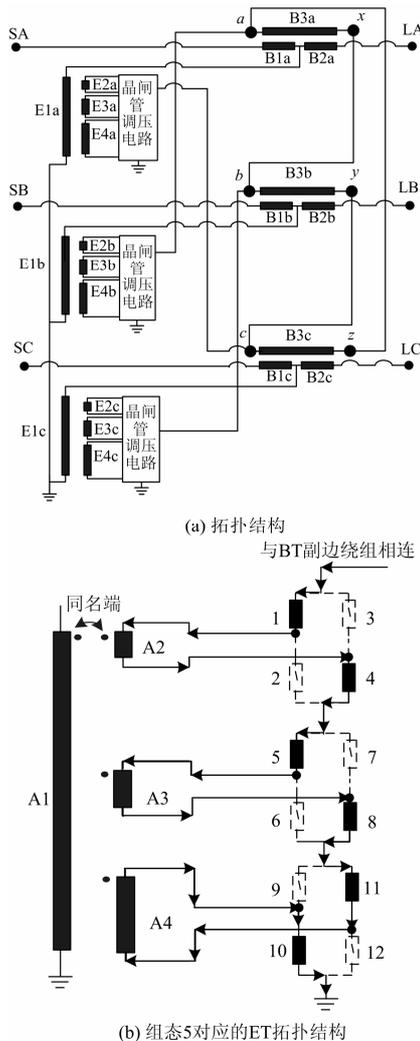


图1 晶闸管控制移相器结构
Fig. 1 Structure of TCPS

1.2 双芯对称离散型移相器电磁暂态建模

根据华东电网某工程规划及上文介绍的移相器工作原理,建立如图2所示电磁暂态仿真模型,系

统采用典型 500 kV 输电线路参数,线路参数为 $z_1 = 0.036 + j0.302 \Omega/\text{km}$, $z_0 = 0.108 + j0.906 \Omega/\text{km}$,长度为 300 km,采用双端电源供电。可控移相器共 ± 13 档可调,移相器安装于 MN 线路靠近 M 一端。两端保护测量线路 MN 两侧的电流和母线 M、N 电压。

2 可控移相器接入对纵联保护影响仿真分析

对于含 TCPS 的线路,工程上一般在移相器两侧分别安装互感器。如果采用安装于移相器靠近线路侧的互感器,则移相器位于纵联保护区外,从理论上讲不影响纵联保护工作,但其保护范围无法涵盖移相器本身。如果采用安装于移相器靠近母线侧的互感器,则需要考虑移相器对方向元件的影响以及移相器对差动电流的影响。因此从分析的角度,本文重点分析了采用母线侧互感器时对纵联保护的影响。

2.1 纵联方向保护原理

纵联方向保护通过比较故障时线路两端的故障方向实现区内外故障的判别,构成保护判据[2]。对于纵联方向保护,其核心元件是方向元件。目前应用的主要方向元件为反应故障分量的方向元件,其正向动作判据通常如式(1)~式(3)所示。

$$270^{\circ} \geq \arg \frac{\Delta \dot{U}_1}{Z_{s1} \Delta \dot{I}_1} \geq 90^{\circ} \quad (1)$$

$$270^{\circ} \geq \arg \frac{\dot{U}_2}{Z_{s1} \dot{I}_2} \geq 90^{\circ} \quad (2)$$

$$270^{\circ} \geq \arg \frac{\dot{U}_0}{Z_{s0} \dot{I}_0} \geq 90^{\circ} \quad (3)$$

其中: $\Delta \dot{U}_1$ 、 \dot{U}_2 、 \dot{U}_0 表示正序、负序和零序的故障分量电压; $\Delta \dot{I}_1$ 、 \dot{I}_2 、 \dot{I}_0 表示正序、负序和零序的故障分量电流; Z_{s1} 、 Z_{s0} 表示背侧系统等值正序和零序阻抗。

其中式(1)可应用于各种类型故障,包括三相短路。式(2)主要应用于不对称短路,式(3)主要应用于接地故障。

2.2 电流差动保护

电流差动保护是目前性能最好的保护方式,其保护原理简单可靠。但如果直接应用于含 TCPS 的线路,需要解决差动电流的计算问题,特别是对于互感器安装于母线侧的情况。

当互感器安装于母线侧时,由于移相器位于保护区内且移相器两侧电流相位不同,类似于变压器保护的移相计算,应用电流差动保护时,也需要考虑移相角的影响。为此,我们给出了几种可能的差

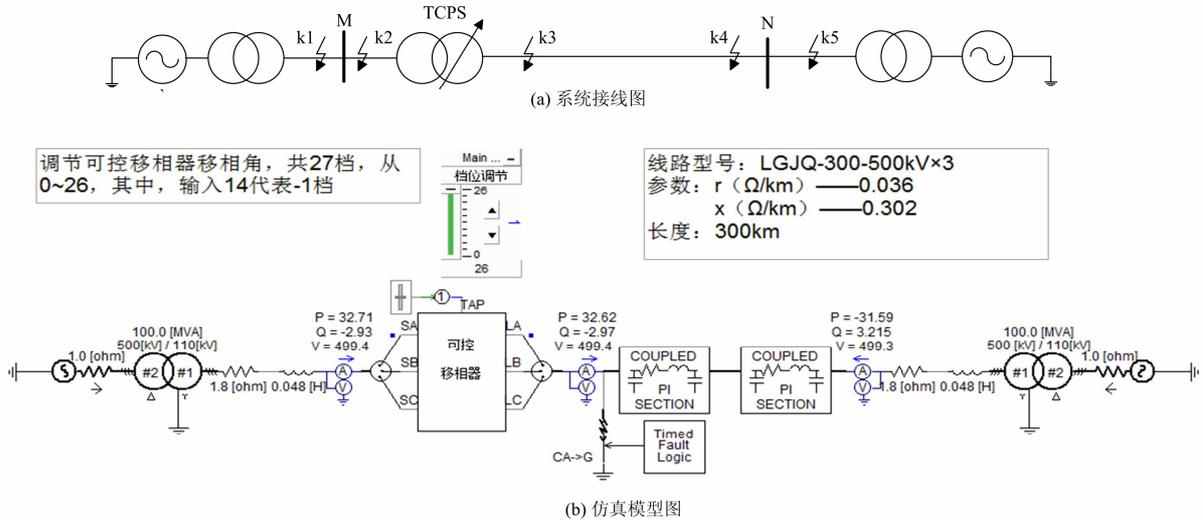


图 2 仿真模型

Fig. 2 Simulation model

动电流计算方式, 其表达式为

$$I_{diff} = \left| \dot{I}_{M\phi} + \frac{\dot{U}_{N\phi}}{\dot{U}_{M\phi}} \cdot \dot{I}_{N\phi} \right| \quad (4)$$

$$I_{diff} = \left| \dot{I}_{M1} + \frac{\dot{U}_{N1}}{\dot{U}_{M1}} \cdot \dot{I}_{N1} \right| \quad (5)$$

$$I_{diff} = \left| \dot{I}_{M1} + e^{j\varphi} \cdot \dot{I}_{N1} \right| \quad (6)$$

其中: $\dot{I}_{M\phi}$ 、 $\dot{I}_{N\phi}$ 表示线路 M、N 两侧测量的相电流; $\dot{U}_{M\phi}$ 、 $\dot{U}_{N\phi}$ 表示线路 M、N 两侧测量的母线相电压; ϕ 表示 A、B、C 的相别; \dot{I}_{M1} 、 \dot{I}_{N1} 表示线路 M、N 两侧测量的正序电流; \dot{U}_{M1} 、 \dot{U}_{N1} 表示线路 M、N 两侧测量的母线正序电压; $e^{j\varphi}$ 表示按移相器档位确定的移相角度; I_{diff} 表示差动电流。

因此式 (4) 类似于分相电流差动, 式 (5)、式 (6) 类似于正序电流差动。上述三种差动判据是否可行, 需要通过仿真分析加以研究。

仿真分析中故障点选择了几个典型的故障点, 包括: 线路 MN 靠近 M 端位于移相器左侧的故障点 (图中 K2), 线路 MN 靠近 M 端位于移相器右侧的故障点 (图中 K3), 线路 MN 靠近 N 端故障点 (图中 K4), 线路 MN 靠近 M 端反向出口故障 (图中 K1) 和线路 MN 靠近 N 端反向出口故障 (图中 K5)。

2.3 可控移相器对方向元件的影响分析

采用移相器母线侧 CT 和母线 PT 的测量数据, 仿真分析了移相器在不同档位分别在区内外发生三相短路、单相接地短路、两相相间短路以及两相短路接地时, 方向元件的动作特性。

仿真结果表明, 正序故障分量方向元件在各种

故障情况下均能正确判断故障方向; 负序方向元件在各种不对称故障中均能正确判断故障方向; 零序方向元件在各种接地故障中均能正确判断故障方向。表 1、表 2 给出了区内两相接地故障时, 正序

表 1 M 端区内两相短路接地故障时正序故障分量方向元件偏离最大灵敏角角度

Table 1 Angle difference from the maximum sensitive angle of positive directional component at M side during the inner faultt

档位	M 侧方向 元件一	M 侧方向 元件二	N 侧方向元件
-13	-5.743 3	-2.087 7	-6.101 9
-12	-5.707 3	-2.174 5	-6.066 4
-11	-5.710 8	-2.290 1	-6.088
-10	-5.543 8	-2.260 6	-5.872 9
-9	-5.512 7	-2.343	-5.866 7
-8	-5.528 2	-2.449	-5.897 9
-7	-5.426 2	-2.357 4	-5.727 8
-6	-5.409 8	-2.417	-5.671 1
-5	-5.457 5	-2.531 9	-5.756 2
-4	-5.489 5	-3.186 2	-5.774 7
-3	-3.199 7	-9.465 3	-6.668 5
-2	-5.450 6	-3.239 9	-5.784 9
-1	-5.074 6	-2.941 3	-5.260 2
0	-5.096 7	-2.987 7	-5.417 4
1	-4.274 5	-5.924 6	-6.207 4
2	-4.928 4	-2.706 2	-5.221 1
3	-3.199 7	-9.465 3	-6.668 5
4	-4.005	-5.957 5	-5.726 4
5	-4.74	-1.818 2	-5.079 9
6	-3.756 8	-5.923 7	-6.100 3
7	-4.885 7	-1.844 2	-5.318 6
8	-4.942 7	-1.882 2	-5.405
9	-4.943 3	-1.803 2	-5.412 3
10	-4.623 4	-1.381 5	-5.209 6
11	-4.551 7	-1.131 7	-4.968 1
12	-4.463 3	-0.925 6	-4.829
13	-4.4527	-0.810 6	-4.985

表 2 M 端区内两相短路接地故障时负序方向元件
偏离最大灵敏角角度

Table 2 Angle difference from the maximum sensitive angle
of negative sequence directional component at M
side during inner fault

档位	M 侧方向 元件一	M 侧方向 元件二	N 侧方向元件
-13	-4.375 1	-0.259 9	-4.363 6
-12	-4.180 9	-0.210 9	-4.142 4
-11	-3.930 1	-0.091 1	-3.860 4
-10	-3.463 2	0.238 5	-3.461 8
-9	-3.144 9	0.419 9	-3.106 9
-8	-2.921 8	0.539	-2.876 5
-7	-2.963 7	0.499 5	-3.048 9
-6	-2.609 4	0.771 3	-2.769 3
-5	-2.321 3	0.979 3	-2.482 4
-4	-2.042 7	0.552 3	-2.228
-3	-0.344 4	2.160 3	-0.740 3
-2	-1.357 6	1.129	-1.642 5
-1	-0.955	1.431 9	-1.186 9
0	-0.778	1.58	-1.041 9
1	-0.621 4	1.740 3	-0.834 4
2	-0.592	1.889 1	-0.979 1
3	-0.344 4	2.160 3	-0.740 3
4	-0.049 1	2.514 7	-0.499 5
5	0.219 4	3.456 9	-0.149 2
6	0.312 1	3.603 9	-0.098 1
7	0.593 3	3.960 9	0.042 3
8	0.984 8	4.369 4	0.261 9
9	1.359 2	4.822 7	0.526
10	1.325 2	4.850 3	1.276
11	1.756 9	5.499 8	0.945 6
12	1.555 1	5.434	0.707 4
13	1.582 7	5.569 4	0.786 8

和负序方向元件偏离最大灵敏角的情况，其中，M 侧方向元件一为利用线路 M 端母线侧互感器信息实现方向元件的情况；M 侧方向元件二为利用线路 M 端靠近线路一侧的互感器信息实现的方向元件情况。

2.4 可控移相器对电流差动保护的影响分析

采用移相器母线侧 CT 和母线 PT 的测量数据，仿真分析了移相器在不同档位分别在区内外发生三相短路、单相接地短路、两相相间短路以及两相短路接地时，三种差动判据的动作特性。

对于由式 (4) 构成的分相电流差动而言，其区内外动作情况如表 3 所示。

由表 3 可见，对于判据式 (4)，当发生区内故障时，故障相均可正确动作，但健全相存在误动现象。而区外故障时，不论故障相或健全相，均存在误动现象。

对于由式 (5) 构成的正序电流差动保护，区内故障时保护均可正确动作。而区外故障时同样存在误动现象，不再赘述。

对于由式 (6) 构成的正序电流差动保护，区内故障时，保护均可正确动作；区外故障时，可靠不动作。

因此若采用移相器靠近母线侧的互感器信息构成电流差动保护，宜采用式 (6) 作为差动判据，但判据式 (6) 需要额外的档位信息。

表 3 区内外不同类型故障时，判据式 (4) 仿真结果

Table 3 Simulation results of criterion (4)

故障位置	故障类型	动作情况
区内	三相短路	正确动作
区内	两相短路	故障相正确动作
区内	两相短路接地	故障相正确动作
区内	单相接地	故障相正确动作
区外	三相短路	部分档位出现误动
区外	两相短路	部分档位出现误动
区外	两相短路接地	部分档位出现误动
区外	单相接地	部分档位出现误动

2.5 采用移相器线路侧 CT 和母线 PT 时纵联保护的适用性分析

当采用移相器靠近线路侧的互感器构成纵联保护时，不论对于方向元件还是电流差动元件，移相器本身均为保护区外的元件，理论上不会对其保护特性产生影响，仿真结果如表 1、表 2。

因此从工程角度而言，尽管方向元件不受互感器安装位置的影响，但档位切换时有可能引起方向保护误动，这类类似于纵联方向保护需采用线路侧电流互感器以防止非全相运行导致保护误动的情况，因此对于含 TCPS 的线路，仍以采用线路侧互感器为宜。而对于电流差动保护，判据式 (6) 虽然可以可靠工作，但需要选相元件配合选相，同时需要额外的档位信息，使得保护复杂化。

所以对于安装了 TCPS 的输电线路，其纵联保护宜使用移相器靠近线路侧的互感器，此时保护原理无需修改即可使用。

3 结论

本文分析了双芯对称离散型可控移相器 TCPS 的工作原理，并建立了相应的电磁仿真模型，在此基础上分析了含 TCPS 线路纵联保护的特性，包括纵联电流差动保护和方向元件的特性。研究表明：纵联方向保护的方向元件不受互感器安装位置的影响，但若采用母线侧电流互感器时，档位切换可能

引起保护误动, 需加以考虑; 对于电流差动保护, 当采用母线侧电流互感器时, 由于线路相间存在耦合, 需要对差动判据加以修正; 而采用线路侧电流互感器时, 现有差动保护可以直接使用。因此, 从工程实施的观点, 移相器两侧均应配置互感器, 而对于保护而言, 宜使用靠近线路一侧的互感器。

参考文献

- [1] GÜTH G, BAKER R, EGLIN P. Static thyristor-controlled regulating transformer for AC transmission[C] // IEE Int Conf on Thyristor and Variable Static Equipment for AC and DC Transmission, London, 1981.
- [2] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
ZHANG Bao-hui, YIN Xiang-gen. Power system protective relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [3] HIGORANI N G. Flexible AC transmission[J]. IEEE Spectrum, 1993, 30(4): 40-45.
- [4] 黄柳强, 郭剑波, 卜广全, 等. FACTS 协调控制研究进展及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 138-147.
HUANG Liu-qiang, GUO Jian-bo, BU Guang-quan, et al. Research progress and prospect of FACTS coordinated control[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 138-147.
- [5] 丁理杰, 杜新伟, 周惟婧. SVC 与 STATCOM 在大容量输电通道上的应用比较[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 77-81, 87.
DING Li-jie, DU Xin-wei, ZHOU Wei-jing. Comparison of transmission path of power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 77-81, 87.
- [6] 刘青, 王增平. FACTS 元件对距离保护产生的影响分析[J]. 中国电力, 2004, 37(10): 19-21.
LIU Qing, WANG Zeng-ping. Affection and solving methods of protection by FACTS component[J]. Electric Power, 2004, 37(10): 19-21.
- [7] KRAMER A, RUFF J. Transformers for phase angle regulation considering the selection of on-load tap-changers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(2): 518-525.
- [8] JAMALI S, KAZEMI A, SHATERI H. Measured impedance by distance relay for inter phase faults in presence of TCPST[C] // Power Systems 2008 Conference, Clemson, USA, 2008.
- [9] 李立, 鲁宗相, 周双喜. 典型 FACTS 设备对连锁故障风险影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 1-7.
LI Li, LU Zong-xiang, ZHOU Shuang-xi. Research on the effect of typical FACTS devices on cascading failure risk[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 1-7.
- [10] 李秋硕, 张剑, 肖湘宁, 等. 基于 RTDS 的机电-电磁暂态混合实时仿真及其在 FACTS 中的应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 219-226.
LI Qiu-shuo, ZHANG Jian, XIAO Xiang-ning, et al. Electromechanical-electromagnetic transient real-time simulation based on RTDS and its application to FACTS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 219-226.

收稿日期: 2014-07-09; 修回日期: 2014-09-10

作者简介:

陈 新 (1974-), 男, 工程硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

姚 旭 (1960-), 男, 教授级高级工程师, 从事电力系统继电保护和安全自动装置工作;

康小宁 (1968-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护及变电站自动化技术。E-mail:

kangxn@mail.xjtu.edu.cn