

超高压线路串补电容的微机保护算法

邹蕴韬, 谭亲跃, 朱建行, 赵华, 朱宝慧, 张君成, 周雷

(西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 在超高压输电线路系统中, 串联电容补偿具有提高输送容量和改善系统稳定性等优点, 但由于串补电容的存在导致输电线路继电保护存在一系列问题。根据串补电容对距离保护和零序方向保护影响的理论分析, 提出了基于 TCSC 串补电容的线路微机保护算法。算法利用 TCSC 的运行参数, 考虑了串补电容在暂态过程以及电容运行状态对保护参数整定的影响, 以避免 TCSC 使保护拒动或误动。最后通过仿真运行表明, 该算法对于带有不同运行状态的 TCSC 的输电线路有很强的适应力和可靠性, 可以满足线路继电保护的基本要求。

关键词: 超高压线路; 晶闸管控制串联电容; 微机保护; 算法

Microprocessor-based protection algorithm in UHV transmission lines with series compensated capacitor

ZOU Yuntao, TAN Qinyue, ZHU Jianhang, ZHAO Hua, ZHU Baohui, ZHANG Juncheng, ZHOU Lei
(Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In ultra high voltage transmission system, series compensated capacitor has many advantages such as enhancing the transmission capacity and improving the stability of power system. But series compensated capacitor also generates many problems in protective relaying of transmission lines. In this paper, according to the theoretical analysis of the distance protection and zero-sequence direction protection affected by series capacitor, it is presented that a microprocessor-based protection algorithm based on TCSC capacitor. The algorithm uses the operation parameters of TCSC, which considers the effect of the transient process of series compensated capacitor and the state of capacitor operation to protection parameters setting. So it can avoid protective relaying rejection or malfunction. At last the results of computer simulation confirm that this algorithm has high adaptability and reliability in different TCSC operation, which can satisfy the basic requirements of protective relaying.

Key words: ultra high voltage transmission line; thyristor controlled series capacitor (TCSC); microprocessor-based protection; algorithm

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)01-0045-05

0 引言

串补电容在长距离输电线路中广泛应用, 由于 TCSC 运用电力电子器件及其控制方法, 使串补电容器的有效容抗可以快速平滑地调节, 不仅提高了线路传输容量, 而且提高了系统的暂态稳定性, 优化了电力系统潮流, 降低了线路传输损耗, 抑制次同步谐振^[1-3]。但这也让线路继电保护面临很大挑战, 串补电容线路会出现电压反向和电流反向的现象, 对距离保护主要体现在保护范围缩小和方向性的丧失, PT 互感器的位置同样也会影响方向继电器的动作, 并且在暂态过程中产生各类谐波对现有继电保护造成影响^[4-6]。

目前有很多关于串补电容对继电保护影响的研究和针对串补线路的保护原理^[7-13], 在微机保护广泛应用于超高压输电线路的现状下, 有必要提出相关的微机保护算法以适应实际应用。

本文参考文献[14-16]提出一种微机保护算法, 根据 TCSC 稳态运行参数和暂态运行状态, 并考虑串补电容 MOV 保护的影响, 利用距离保护原理和零序方向保护原理判断超高压输电线路故障状态, 以保证继电保护的可靠性和适应力。

1 TCSC 特性分析

TCSC 通过控制触发脉冲改变双向晶闸管 TCR 的触发角 α 来控制电感支路的电流, 等效改变 TCSC

两端的等效容抗。其稳态基频等效阻抗表达式(不包含 MOV)如式(1)^[17]。

$$X_{\text{TCSC}} = \frac{1}{\omega C} - \frac{A}{\pi \omega C} (2\sigma + \sin 2\sigma) + \frac{4A}{\pi \omega C (k^2 - 1)} \cos^2 \sigma (k \tan k\sigma - \tan \sigma) \quad (1)$$

$$A = \frac{k^2}{k^2 - 1}; \quad k = \frac{\omega_0}{\omega}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

式中: 2σ 为可控硅的导通角, $2\sigma = 2\pi - 2\sigma$; L 为 TCR 串联电感; C 为 TCR 并联电容。

TCSC 自身带有保护, 包括氧化锌电阻 MOV、旁路电感、旁路间隙和旁路断路器 CB。当 TCSC 过载且 MOV 过热时, 间隙闪络旁路 MOV, 旁路断路器合闸^[18]。

由于氧化锌电阻 MOV 的存在, MOV 的非线性特性会影响 TCSC 暂态过程的基频阻抗, 如果不考虑 MOV 的影响将容易得到错误的结论。Goldworthy 通过大量的算例计算得到了一个可用于工频基波计算的串补电容器组和 MOV 组合模型^[18]为

$$Z_{\text{CMOV}} = R_{\text{CMOV}} - jX_{\text{CMOV}} \quad (2)$$

$$R_{\text{CMOV}} = X_C (0.0745 + 0.49e^{-0.243I_{\text{pu}}} - 35e^{-5I_{\text{pu}}} - 0.6e^{-1.4I_{\text{pu}}}) \quad (3)$$

$$X_{\text{CMOV}} = X_C (0.101 - 0.005749I_{\text{pu}} + 2.088e^{-0.8566I_{\text{pu}}}) \quad (4)$$

当 $I_{\text{pu}} = I/I_{\text{pl}} > 0.98$ 时, Z_{CMOV} 满足上式。其中 I_{pu} 为 MOV 的保护电流水平, 一般为电容器额定电流的 2~3 倍。

TCSC 一般都带有 MOV 保护且可以视为等效电容器, 将式(1)代入式(3)、式(4)作为串补装置两端在保护过程中故障暂态下的估算阻抗, 记为 R_{CRP} 和 X_{CRP} 。

2 微机保护算法介绍

线路模型为双端电源, 串补电容在线路首端, 微机保护设备使用 LFP-901A。LFP-901A 具有高频保护、距离保护、零序保护。串补电容对高频保护中的高频零序方向保护、距离保护中的接地距离保护和相间距离保护产生不利影响。

2.1 距离保护算法

串补电容会使保护范围缩小, 在正向故障中, 测量阻抗 Z_m 由原来的 Z_k 变为 $Z_k - X_{\text{TCSC}}$, 这样使测量的短路故障点比实际故障点要小, 补偿后导致保护距离缩短。如图1(a)所示, 串补电容位于线路首端时, 补偿后阻抗轨迹上移, 使轨迹的一部分坐落在特性圆外。

当 PT 在母线侧时, 测量阻抗如图1(b)虚线所示。在正向出口侧一定距离内出现电压反向, 使测量阻抗坐落在特性圆外, 即正向出口侧出现拒动作。当 PT 在线路侧时, 测量阻抗如图1(b)实线所示, 在反向出口侧一定距离内测量阻抗会坐落在特性圆内, 即反向出口侧出现误动作。

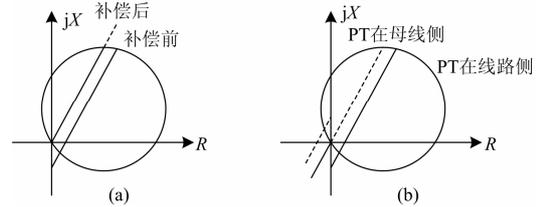


图 1 串补电容对测量阻抗的影响

Fig. 1 Influence of measured impedance by series compensated capacitor

由上述分析距离保护算法将通过 TCSC 的估算阻抗进行阻抗补偿, 以消除保护范围缩小和错误动作的情况。

正常运行时, 实时监控 TCSC 旁路断路器状态, 标志量为 TCSCCB, 电容未旁路时标志量为 1, 旁路时标志量为 0。具体算法如下。

(1) 保护整定时: 没有串补电容时线路末端短路的整定参数 Z_{RDZ} 和 Z_{XDZ} 。整定保护参数时确定 PT 位置, PT 位置标志量为 PTFLAG, PT 在母线时标志量为 1, 在线路时标志量为 0。由两点乘积算法计算得到的测量阻抗分别为 R_m 和 X_m 。

(2) 判断 X 、 R 是否在偏区内, 判断流程为

若 TCSCCB=1 且 PTFLAG=1 时, 修正测量阻抗为: 若 $R_m > 0$ 时(正向), $X = X_m + X_{\text{CRP}}$, $R = R_m - R_{\text{CRP}}$; 当 $R_m < 0$ (反向), $X = X_m$, $R = R_m$ 。

若 TCSCCB=1 且 PTFLAG=0 时, 修正测量阻抗为: 若 $R_m > 0$ 时, $X = X_m$, $R = R_m$; 当 $R_m < 0$ 时, $X = X_m - X_{\text{CRP}}$, $R = R_m + R_{\text{CRP}}$ 。

若 TCSCCB=0 时, 修正测量阻抗为 $X = X_m$, $R = R_m$ 。

(3) 比较修正测量阻抗 R_m 和 X_m 与整定值 Z_{RDZ} 和 Z_{XDZ} , 判断故障是否为区内故障, 并执行相应的动作程序。

2.2 零序方向算法

零序功率方向元件接入零序电压和零序电流, 反应于零序功率的方向而动作。补偿度小于 1, 即 TCSC 零序阻抗值小于线路正向零序阻抗值, 正向零序阻抗总体呈感性, 而系统反向阻抗必然呈感性。当 PT 安装在母线侧, 无论是正向故障或是反向故障, 保护不会拒动或误动。当 PT 安装在线路侧,

正向故障时不会拒动或误动,但反向故障时,由于母线处往往有大型变压器且中性点直接接地,在某个补偿度下 X_{TCSC} 的容抗值会大于母线反向系统阻抗值使保护安装处到系统中性点的阻抗呈容性,将导致方向识别错误。

一般情况下,认为在系统中除了补偿装置以外其余各元件的零序阻抗角相同,阻抗分解为电阻分量和电抗分量后串补电容会使电抗分量降低,零序方向保护动作正确与否的关键在于串补电容容抗与反向系统零序等值阻抗之间的关系。算法具体如下。

(1) 引入标志量 PTFLAG、TCSCCB。故障时利用继电保护算法测得的零序电抗相位 Φ_{Z_0} 。引入反向标志量 REVERSE 判断是否会出现测得的零序功率方向与实际方向相反。

(2) 当 PTFLAG=0 且 TCSCCB=1 时,零序阻抗相位 Φ_{Z_0} 。若 $\Phi_{Z_0} < 0$ 时,令 REVERSE=1; 否则 RESERVE=0。PTFLAG 和 TCSCCB 标志量的其余情况均将 RESERVE 归零。

(3) 零序电流经过一阶差分与零序电压比相(采样频率为 1 000 Hz 时移相约 81°)。计数器值为

$$g = \sum_{k=1}^N \{3u_0(k) \oplus [3i_0(k) - 3i_0(k-1)]\}$$

式中, N 为基波信号一周期采样点数。当标志量 REVERSE=0 时, $g > 0$ 判为正向接地, $g < 0$ 判为反向接地。当 REVERSE=1 时, $g < 0$ 判为正向接地, $g > 0$ 判为反向接地。

(4) 故障区域判断完成后进入相应的动作程序。

3 仿真验证

仿真模型选用 500 kV 电压等级的双端电源系统,输电线路全长 300 km,采用分布参数模型,TCSC 正向线路长度 200 km,保护类型为稳态保护,不计 TCSC 模型的电阻。仿真通过不同的补偿度、故障距离和故障类型测试了两种保护算法,算例较多未能完整列出仅列出部分结果,计算结果以 A 相为例。

距离保护算法仿真结果如表 1、表 2 所示,短路时距离保护的阻抗波形如图 2 所示。

距离保护仿真结果表明,在不同的补偿度下新算法能以较高的精度测得故障环路线路段的准确电抗值,对于消除串补电容对保护和测距产生的不利影响,新算法的结果比较理想,避免了保护可能出现的拒动或误动以及保护范围的缩减,解决了方向性丧失和保护范围缩小的问题。

表 1 距离保护算法仿真部分结果

Table 1 Result of distance protection algorithm simulation

故障类型	故障 距离/km	X_1	X_2	X	传统 保护	新算法
单相接地	正向 60	16.64	-15.74	16.66	拒动	✓
两相接地	正向 60	16.64	-15.56	16.84	拒动	✓
三相短路	正向 80	22.22	-10.23	22.17	拒动	✓
两相短路	正向 80	22.22	-10.05	22.35	拒动	✓
两相短路	正向 160	44.76	12.36	44.76	✓ ·	✓
单相接地	正向 160	44.76	12.43	44.83	✓ ·	✓
两相接地	反向 30	-8.31	-8.30	-8.30	✓	✓

注:系统补偿度为 40%, $X_{CRP} = 32.40 \Omega$ 。互感器在母线侧,电抗单位为 Ω 。 X_1 为无串补时测量电抗, X_2 为有串补时测量电抗, X 为新算法修正测量电抗。后面两项为保护动作情况,·表示距离测量不正确,✓表示动作正确且测距正确。

表 2 距离保护算法仿真部分结果

Table 2 Result of distance protection algorithm simulation

故障类型	故障 距离/km	X_1	X_2	X	传统 保护	新算法
单相接地	反向 40	-11.09	9.44	-11.09	误动	✓
两相接地	反向 40	-11.09	9.42	-11.11	误动	✓
三相短路	反向 60	-16.65	3.89	-16.64	误动	✓
两相短路	反向 60	-16.64	3.84	-16.69	误动	✓
两相短路	反向 85	-23.61	-3.11	-23.64	✓ ·	✓
单相接地	反向 85	-23.61	-3.06	-23.59	✓ ·	✓
两相接地	正向 30	8.31	8.30	8.30	✓	✓

注:系统补偿度为 24%, $X_{CRP} = 20.53 \Omega$ 。互感器在线路侧,电抗单位为 Ω 。 X_1 为无串补时测量电抗, X_2 为有串补时测量电抗, X 为新算法修正测量电抗。后面两项为保护动作情况,·表示距离测量不正确,✓表示动作正确且测距正确。

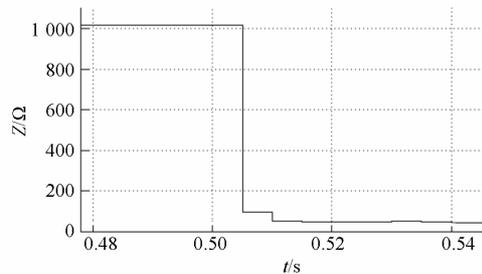


图 2 正向 160 km 短路距离保护阻抗波形

Fig. 2 Reactance waveform of distance protection in forward 160 km fault

高频零序方向算法仿真结果如表 3 所示,测量零序阻抗相角随系统反向零序阻抗值的变化情况如图 3 所示。零序方向算法仿真结果表明,对于 PT 在线路侧的串补线路预防反向系统零序电抗小于串补容抗导致拒动有较好的适用性,其单相接地故障时零序阻抗相角随系统反向零序电抗值的变化关系如图 3 所示,当零序阻抗相角过零即零序阻抗性质

发生变化零序方向保护方向识别错误条件满足，标志位 RESERVE 可以有效避免错误动作。

表 3 零序方向算法仿真部分结果

Table 3 Result of zero sequence directional protection algorithm simulation

故障类型	反向系统 零序电抗	ϕ_1	ϕ_2	传统 保护	新算法
单相接地	72.56	82.13	70.32	√	√
单相接地	43.67	82.12	-10.88	拒动	√
单相接地	20.90	82.13	-82.91	拒动	√
两相接地	65.12	82.14	71.99	√	√
两相接地	41.46	82.13	-19.40	拒动	√
两相接地	28.23	82.13	-77.32	拒动	√

注：系统补偿度为 50%， $X_{CRP} = 43.45 \Omega$ ，故障发生在母线正向 100 km 处，互感器在线路侧，电抗单位为 Ω ，相角单位为 $^\circ$ 。 ϕ_1 为无串补时测量零序电抗相角， ϕ_2 为有串补时测量零序电抗相角。后面两项为保护动作情况(传统保护未考虑拒动问题)，√ 表示可以正确动作。

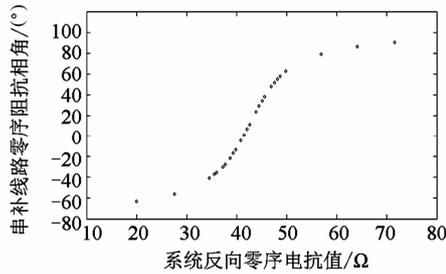


图 3 零序阻抗相角与系统反向零序电抗值关系

Fig. 3 Relationship of angle of zero sequence impedance between zero sequence reactance of opposite direction in system

仿真模型参数如下：

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 0.01 \Omega / \text{km} & R_0 &= 0.1 \Omega / \text{km} \\
 L_1 &= 0.882 \text{ mH} / \text{km} & L_0 &= 2.33 \text{ mH} / \text{km} \\
 C_1 &= 0.01297 \text{ mF} / \text{km} & C_0 &= 0.00827 \text{ mF} / \text{km}
 \end{aligned}$$

短路容量为 100 MVA，双端电源电压为 525 kV 和 475 kV，频率为 50 Hz，电源相角差为 3° ，接地短路时过渡电阻值为 0.1Ω ，相间短路过渡阻抗为 0.01Ω 。

4 结论

串补线路由于串联补偿电容的存在使得串补线路的微机保护算法与常规输电线路的微机保护算法有较大差别，微机保护故障判断必须考虑串补电容的影响。而现代可控串补都带有 MOV 保护，如果不考虑 MOV 保护对继电保护的影响容易得到错误的结论。

本文提出了一种基于 TCSC 串补电容的微机保

护算法，其特点如下：

(1) 考虑了串补电容故障时运行状态和 MOV 保护的影响，更准确地反应继电保护的实际情况。

(2) 根据 TCSC 的运行状态得到其基频阻抗，配合 TCSC 旁路和运行两种状态进行故障处理。

(3) 算法的思想基于串补电容对阻抗变化轨迹和阻抗性质的影响，利用估算阻抗和零序阻抗相角测量的方法进行修正以消除串补电容的影响。

仿真验证该算法具有较强的适应性和可靠性，满足继电保护的要求。

参考文献

- [1] JALALI S G, HEDIN R A, PEREIRA M, et al. A stability model for the advanced series compensator (ASC)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 1128-1137.
- [2] LARSEN E, BOWLER C, DAMSKY B, et al. Benefits of thyristor controlled series compensation[C] // International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Paris, France: CIGRE, August 30 - September 5, 1992, 2: 14/37/38-04.
- [3] GAMA C A, SCAVASSA J L, DA SILVA W M, et al. Prospective application of advanced series compensation to improve transmission system performance[C] // Proceedings of the 1994 35th International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Paris, France, August 28 - September 3, 1994, 1: 14-204.
- [4] 肖立军, 胡少强. 高压输电线串联电容补偿几个问题的探讨[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(6): 80-82.
XIAO Lijun, HU Shaoqiang. Analysis of HV transmission line series capacitors compensation[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2003, 15(6): 80-82.
- [5] 王向平. 串联电容补偿线路的继电保护设计研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(13): 41-44.
WANG Xiangping. Some suggestions on design of protection on the line with series compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1991, 23(13): 41-44.
- [6] 索南加乐, 吴双惠, 候卓, 等. 串补线路故障特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 38-42.
SUONAN Jiale, WU Shuanghui, HOU Zhuo, et al. Fault characteristics analysis for series compensated line[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 38-42.
- [7] 韩彦华, 施围. 串补输电线路的精确故障定位算法[J].

- 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 75-77.
- HAN Yanhua, SHI Wei. Accurate fault location algorithm for series compensated transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 75-77.
- [8] SAHA M M, KASZTENNY B, JZYKOWSKI J. First zone algorithm for protection of series compensated lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 200-207.
- [9] NOVOSEL D, BACHMANN B, HART D, et al. Algorithms for locating faults on series compensated lines using neural network and deterministic methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(4): 1728-1736.
- [10] 刘青, 常彦彦. SSSC 串补线路双端暂态保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 82-87.
- LIU Qing, CHANG Yanyan. Research on two-end transient protection principle for series compensated transmission lines with SSSC[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 82-87.
- [11] 刘青, 王增平, 郑振华. 静止同步串联补偿器对距离保护影响分析的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 39-43.
- LIU Qing, WANG Zengping, ZHENG Zhenhua. Study on the influence of SSSC on the distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 39-43.
- [12] 胡巨, 杨明玉. 基于小波包变换的暂态保护在带 TCSC 输电线路中的应用[J]. 电工技术学报, 2004, 19(12): 83-85.
- HU Ju, YANG Mingyu. Transient protection of TCSC transmission line based on wavelet packet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(12): 83-85.
- [13] 刘家军, 闫泊, 姚李孝, 等. 平行双回线中串补电容对零序电抗型距离保护的影响[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 264-270.
- LIU Jiajun, YAN Bo, YAO Lixiao, et al. Influence of series compensation capacitor on zero-sequence reactance-type distance protection in parallel double-circuit lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 264-270.
- [14] NOVOSEL D, PHADKE A, SAHA M M, et al. Problems and solutions for microprocessor protection of series compensated lines[C] // Proceedings of the 6th International Conference on Developments in Power System Protection, March 25-27, 1997, Nottingham, UK.
- [15] 罗士萍. 微机保护实现原理及装置[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 100-177.
- [16] 高亮. 电力系统微机继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 27-30, 78-153.
- [17] 田杰, 尹建华. 可控串联补偿(TCSC)的分析研究(上)计及 TCSC 详细模型的电力系统稳态、暂态仿真研究[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(10): 43-47.
- TIAN Jie, YIN Jianhua. The analysis of thyristor controlled series compensation: the study of power system steady-state and transient simulation taking into account the TCSC detail model[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(10): 43-47.
- [18] GOLDSWORTHY D L. A linearized model for MOV-protected series capacitors[J]. IEEE PWRS, 1987, 2(4): 953-957.

收稿日期: 2014-06-22

作者简介:

邹蕴韬(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化和继电保护方向;

谭亲跃(1975-), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统运行与控制, 电能质量。E-mail: qinyuetan@126.com