

使用继电器模型研究串补线路的继电保护特性

朱涛¹, 谢小荣¹, 祝达康²

(1. 清华大学电机系, 北京 100084; 2. 上海电力设计院有限公司, 上海 200025)

摘要: 串联补偿线路的保护一直被认为是一个较难的问题。线路保护必须能够适应这些装置带来的变化。在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上, 建立了串联电容补偿和正序电压极化的欧姆继电器的详细模型, 实现了电力系统与继电保护之间的闭环数字仿真, 在此基础上分析了各种情况下串补电容对距离保护的保护区、保护方向性以及测量电抗值的影响, 深入探讨了导致这些影响的关键性因素, 例如电容过电压保护、距离保护极化电压的记忆性等; 并进一步提出了减小不利影响和提高保护可靠性的对策。

关键词: 固定串补电容; 距离保护; 建模; 继电器模型

The influence of fixed series capacitor on distance protection using relay models

ZHU Tao¹, XIE Xiao-rong¹, ZHU Da-kang²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Shanghai Electric Power Design and Research Institute, Shanghai 200025, China)

Abstract: Protection of systems with series compensated lines is considered to be one of the most difficult tasks. Transmission line protection needs to be adapted to the variations introduced by these devices. Based on the PSCAD/EMTDC platform, this paper establishes the detailed simulation model of the fixed series capacitor and memory-polarizes distance relay and then achieves closed-loop digital simulation of distance protection and compensated power system. The influence of series capacitor on the protection scope, directional characteristic and impedance measurement of the distance relay is analyzed under different operation situations. Some of the key factors that may lead to these influences are investigated, such as the over-voltage protection of the capacitor, the remembrance of polarized voltage. Furthermore, some countermeasures are proposed to improve the reliability of distance protection at series-capacitor compensated lines.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (50323002).

Key words: fixed series capacitor; distance relay; modeling; relay model

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)05-0016-05

0 引言

近年来, 我国相继投运了华东电网阳淮线三堡串补站、华北电网大同一房山蔚县串补站、丰万顺串补工程以及南方电网天平串补线路等几项超高压、大补偿度的串补输电工程。它们的投运对于增大系统传输能力、抑制系统可能发生的振荡、提高系统稳定性都起到了很大的作用。但是在线路中加入串联补偿电容可能会引起电压反相、电流反相以及出现暂态低频分量等现象^[1~5], 对继电保护产生不利的影 响, 加大系统继电保护的复杂性。为了确 保继电保护系统的可靠运行, 必须有针对性地分析

串补对继电保护的影响。串联补偿线路的“视在阻抗”很大程度上决定于串补电容的过电压保护, 当过电压保护动作时继电器“看到”的电抗是一个值, 不动作时“看到”的又是另一个值^[1]。在各种原理的保护类型中基于阻抗测量的距离保护必然会受到固定串补电容较大的影响, 因而本文主要论述串联补偿电容给正序电压极化的欧姆继电器带来的影响。

目前很多关于串补电容和各种新型 FACTS 装置对继电保护影响研究的文献都局限在理论分析和实际运行经验的总结上面, 缺乏仿真分析的验证, 例如文献[1~7]。文献[8,9]则介绍了使用 RTDS 和保护装置实物进行实时仿真的方案, 该方案准确可靠但是成本也比较高。还有一种方案就是对继电保护进行建模, 用以代替保护装置实物, 这种方案

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50323002)

极大地降低了实验成本, 而且在保证模型正确性的前提下也具有很高的可信度。文献[10,11]介绍了使用保护模型来实现电力系统与继电保护之间的闭环仿真方法。本文采用的研究方法是继电保护建模仿真, 仿真工具为 PSCAD/EMTDC。在 PSCAD 中建立了固定串补电容和正序电压极化的欧姆继电器的详细模型, 实现了电力系统与继电保护之间的闭环数字仿真, 通过仿真分析研究了固定串补电容可能对距离保护带来的影响, 并提出了相应的解决方案。本文所使用的仿真分析方法对于研究各种新型 FACTS 装置对继电保护的影响也具有一定的参考价值。

1 模型与方法

为了实现对串补线路继电保护的仿真分析, 我们在 PSCAD 中建立了电网仿真模型、固定串补电容模型以及欧姆继电器的模型。

仿真电网的模型采用如图 1 所示的两机输电系统进行仿真分析。考虑到串补的投入不仅对本线路的继电保护会有影响, 还会影响到相邻线路, 因此我们的仿真电网模型中也包括了相邻线路。系统中安装有 4 个距离保护继电器, F1、F2、F3、F4 为可能的故障地点, 它们处于所在线路中的位置分别为 5%、50%、95%和 5%。PT1 和 PT2 为继电器 2 可能选用的电压互感器。

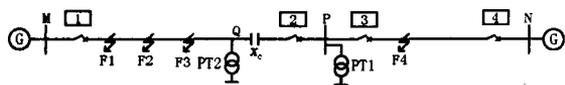


图 1 带固定串补电容的两机输电系统

Fig.1 Two-machine system with a fixed series capacitor

串补电容的主电路仿真模型按照如图 2 所示的原理图搭建。仿真模型考虑了串补电容器、MOV、火花间隙、旁路开关以及放电阻尼回路。MOV、火花间隙和旁路开关共同构成了电容的过电压保护。MOV 是串补本体中一个重要元件, 仿真建模中按照工程实际参数定义了 MOV 的额定电压以及非线性电压-电流特性曲线, 以保证在实现 MOV 的各种保护时有较高的精确度。固定串补的火花间隙与旁路开关均按照理想开关仿真, 并按照工程实际放置了放电回路的阻尼环节。考虑到实际旁路开关的动作延时, 我们在仿真模型中对开关的控制电路也做了相应的设置。

保护继电器的建模是仿真分析的关键点之一。文献[11~13]对继电保护建模做了较详尽的介绍。文献[12] 还将建模仿真的结果与 RTDS 仿真进行了

对比, 实验证明只要模型足够精确, 两者之间的误差非常小。本文中距离保护的模型是使用 PSCAD 的自定义模型功能并用 FORTRAN 代码来实现的。该模型详细模拟了实际的数字式距离保护装置的基本环节, 具有较高的可靠性。

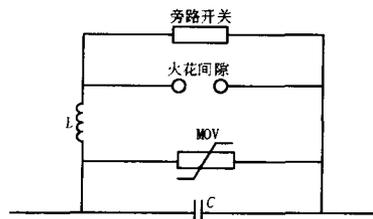


图 2 固定串补电容示意图

Fig.2 Typical configuration of the fixed series capacitor

该模型被分解成如图 3 所示的几个功能模块, 每一个模块都模拟实际继电器中与之对应的硬件或者软件代码。要实现继电保护装置的建模, 首先就要深入了解图 3 中的各个模块, 隔离变压器、模拟低通滤波器、采样保持电路、A/D 转换器、数字直流滤波、全波傅氏算法和判断逻辑的基本原理。然后用适当的建模工具将其实现就可以了。

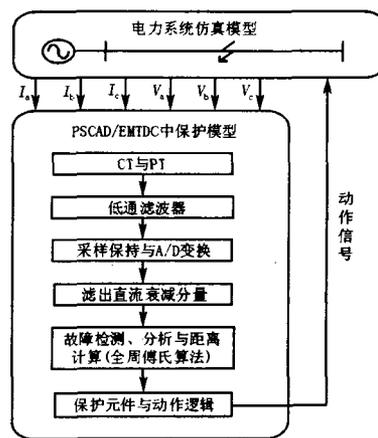


图 3 距离保护模型功能模块图

Fig.3 Relay model function block diagram

要实现系统模型与保护继电器模型的闭环仿真, 还必须依靠 PSCAD/EMTDC 与用户模型之间的接口来实现。PSCAD/EMTDC 的自定义模型功能为用户提供了适合各种类型数据的公用数组作为程序的接口。自定义模型的默认编程语言即为 FORTRAN, 我们可以非常方便地调用保护继电器模型的子函数。在进行仿真研究时, 我们可以按照系统的实际情况, 保护继电器模型从系统模型中取得电压电流值, 经过运算后其输出结果又可以直接控制一次系统的开关, 改变系统的拓扑结构, 真正

实现闭环仿真。

本文最终建立的正序电压极化的欧姆继电器模型包括了瞬时过流元件、相间与接地距离元件的 I 段、II 段以及所有的辅助元件。模型建立了友好的人机界面, 提供了可以根据工程实际的保护功能投退以及相关整定值的修改的人机接口。模型还建立了良好的内部数据输出接口, 用户无须更改源程序便可方便地观测各种内部数据。

2 固定串补电容对距离保护的影响分析

在实现了保护继电器模型与串联补偿系统模型之间的闭环仿真的基础上, 我们就可以仿真分析固定串补电容对继电保护的影响。下面就从串补电容对保护距离、保护方向性以及测量电抗的影响三个方面分别展开。

2.1 对保护范围的影响

输电线路加装串联补偿电容后, 短路阻抗与短路距离之间不再成线性正比关系, 这将使距离保护无法正确测量故障距离, 对其工作将产生不利的影 响。距离保护的测量电抗决定于串补电容是否投入运行和 MOV 保护是否动作。因为当电容的过电压保护动作时继电器“看到”的电抗是一个值, 而当过电压保护不动作时“看到”的又是另一个值。这就给距离保护的 保护范围的整定造成了一定的困难。

在实际情况下, 保护装置都是按照其可能遇到的最坏的工作情况来整定的^[7]。以图 3 中的继电器 2 为例, 选用母线侧电压互感器 PT1, 我们试图保护线路全长的 80%, 如果串补电容的补偿度为 60%。当我们将距离保护 I 段整定为 80%, 串补电容因为 MOV 保护不动作而仍然投入运行, 那么保护 I 段的实际保护范围将会达到 140%, 这是绝对不允许的。因此保护的 I 段必须整定为 20% 以防止超越保护, 但是在这种情况下, 如果固定串补电容的 MOV 保护动作了, 保护 I 段的实际保护范围将只有 20%, F2 将会被视为区外故障^[7]。

对此我们进行了大量的仿真分析。在整定值不调整和调整两种情况下对各个继电器在不同故障下的动作情况进行归纳总结。由于继电器 3 正向故障不受影响, 反相故障与继电器 2 取线路侧电压互感器时反相故障类似, 继电器 4 与继电器 1 类似, 我们仅对继电器 1 和 2 进行了仿真分析。表 1 为整定值不调整情况下各个继电器在各种情况下的工作情况。表 2 为整定值按照前面的理论分析调整了

之后的情况。表中结果对各种类型故障均适用。

表 1 整定值不调整时仿真结果

Tab.1 Simulation results without adjusting the settings

	MOV 不动作			MOV 动作		
	R_1	R_2		R_1	R_2	
		PT1	PT2		PT1	PT2
F1	动作	动作	不动作	动作	不动作	不动作
F2	动作	动作	动作	动作	动作	动作
F3	不动作	动作	动作	不动作	动作	动作
F4	动作	不动作	不动作	不动作	不动作	不动作

表 2 整定值调整时仿真结果

Tab.2 Simulation results with adjusted settings

	MOV 不动作			MOV 动作		
	R_1	R_2		R_1	R_2	
		PT1	PT2		PT1	PT2
F1	动作	不动作	不动作	动作	不动作	不动作
F2	不动作	动作	不动作	不动作	不动作	不动作
F3	不动作	不动作	动作	不动作	动作	动作
F4	不动作	不动作	不动作	不动作	不动作	不动作

可以看到在整定值不调整的情况下若电容的过电压保护能够准确动作, 那么各个继电器在各种情况下均能可靠动作; 若电容过电压保护不动作, 那么可能出现超越保护的情况, 这是不能允许的。因此必须对原有整定值进行调整。从表 2 可以看到, 调整整定值后超越保护现象不再出现, 但是保护范围却缩短了。这与前面理论分析的结果完全一致。

对于距离保护的 II 段, 如果整定为 120% 而电容的 MOV 保护不动作, 那么实际保护范围将达到 180%, 这将可能引起与相邻线路保护的配合问题, 特别是在相邻线路较短的情况下。但是如果整定为 60% 而电容 MOV 保护动作, 那么实际保护范围将只有 60%, 这对于 II 段来讲又是不可以接受的。基于以上分析我们可以得到以下结论: 保护 I 段的整定必须考虑到电容容抗以防止发生超越保护, 保护 II 段的整定不能考虑电容的容抗以防止在电容 MOV 保护动作情况下发生保护范围的缩短^[7]。

前面已经提到距离保护的 I 段整定值必须严格限制以防止超越保护。实际情况下这一保护范围将可能进一步缩短, 因为低频分量将会引起测量电抗的波动^[2]。这一点将在后面详细论述。

2.2 对距离保护方向性的影响

由于固定串补电容可能会在系统中引起电压反相和电流反相, 因此可能造成距离保护失去方向性, 从而发生正向区内故障拒动和反相故障误动的情况。以图 1 所示系统中的继电器 2 为例, 当采用母线侧电压互感器 PT1 时, 反向故障与无串补线路相同。正向近端故障时可能会引起电压反向, 从而导

致继电器拒动。同理,当采用线路侧电压互感器 PT2 时,反向故障继电器可能会拒动。一般来讲,采用带有记忆作用的极化电压能够有效地解决这个问题。

为了验证这一结论,我们进行了仿真分析。图 4 是极化电压的记忆作用对距离元件影响示意图。可以看到在短路发生后极化电压相角发生大的波动,但是记忆环节却能在一定时间保证其相角基本不变。对于正向故障,极化电压记忆作用未消失前距离元件能可靠动作,但记忆作用消失以后就不能保证动作的可靠性了。对于反相故障,极化电压记忆作用未消失前距离元件能可靠不动作,但记忆作用消失以后就不能保证动作的可靠性了。这与理论分析的结果也是完全一致的。从图中还可以看到极化电压的记忆作用持续时间足以保证正向故障不发生拒动反相故障不发生误动。

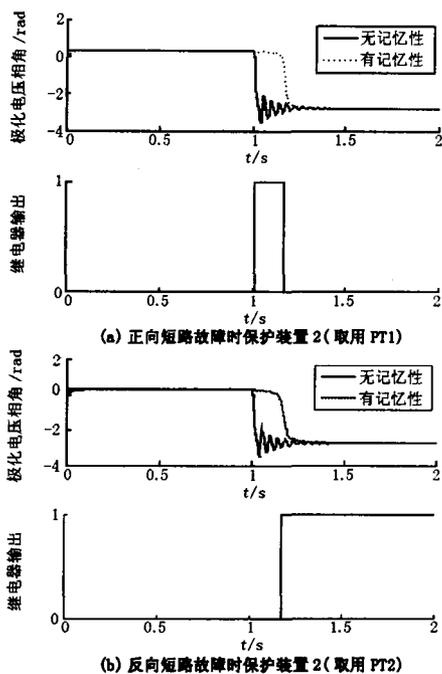


图 4 极化电压记忆作用对距离元件影响示意
Fig.4 Effect of memory of polarized voltage to distance elements

通过前面的理论分析和仿真分析,我们可以得到采用具有良好记忆作用的正序极化电压的距离继电器能够保证串补线路中距离保护的方向性。

2.3 对短路后测量阻抗的影响

前面的分析表明,有串补电容线路发生故障时,系统将会有频率为 ω_0 的低频分量,该低频分量在以某一时间常数衰减的同时,还以 $\omega \sim \omega_0$ 的角速度相对于工频交流分量转动^[2]。使用继电器模型能

够十分方便地观测继电器的测量电阻电抗值。图 3 所示系统中对于故障 F4 继电器 1 测量到的阻抗如图 5 所示,可以看到在没有考虑到电容的 MOV 保护时,短路发生后需要较长时间测量阻抗才能够稳定下来。这种故障阻抗的变化,可能会引起保护区的超越或者缩短。

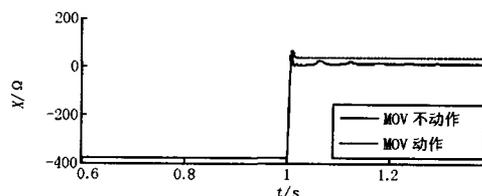


图 5 串联补偿线路故障前后测量电抗的变化
Fig.5 The change of measured impedance before and after fault in a series compensated line

为了更好地分析故障后距离继电器的测量电阻和电抗,图 6 将各种情况下的 $R-X$ 曲线综合到了一起。最初分别对应于 MOV 动作和不动作的串联补偿系统的阻抗轨迹完全重合,这是因为串补电容均完全投入,两者的电路完全一致。在短路发生后的某一时刻两个曲线开始分开,这是因为电容的 MOV 保护动作,将电容短路,从而对应 MOV 动作的串联补偿系统的阻抗轨迹和对应无串补线路的阻抗轨迹迅速收敛到同一点。MOV 保护不动作的串联补偿系统的阻抗轨迹则以螺旋的形式逐渐收敛到最终的测量电抗,由于收敛较慢而且有一定的波动,可能会引起保护范围的超越或者缩短。

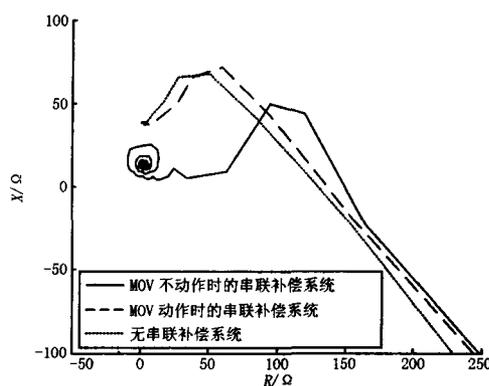


图 6 阻抗轨迹图
Fig.6 Impedance trajectories

无论是 MOV 还是空气间隙开关,当它们导通时都改变了距离继电器所“看到”的电抗。但它们的影响还不仅限于此,当 MOV 和空气间隙开关可靠动作时,还能够有效地抑制低频分量,缩短暂态过程,从而提高距离保护的可靠性。由此可见串补电容的过电压保护对距离保护的影响至关重要^[1]。

3 结论

只要能够建立保护继电器的详细精确模型,完全可以用来代替保护装置事物研究各种新型装置对继电保护带来的影响。固定串补电容对距离保护范围可能造成较大影响。若不更改保护的整定值,距离保护在 MOV 保护不动作的情况下可能会发生超越保护,这是不能允许的,因此需要对保护范围进行重新整定。在重新整定后又不可避免地引起保护范围缩短,在补偿程度较大线路,距离保护 I 段可能变得很小。根据理论分析,电压反相、电流反相引起的距离保护失去方向性的问题,在使用带记忆作用的极化电压后一般也能得到很好的解决。仿真分析验证了这一结论,因为串入电容而正向故障拒动和反相故障误动的情况均不会出现。固定串补电容可能会引起故障后测量电抗值的波动,这可能会使保护范围发生超越或者缩短。若电容的 MOV 保护动作,这个问题可以得到较好的解决。

参考文献

- [1] Marttila R J. Performance of Distance Relay Mho Elements on Mov-protected Series-Compensated Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(3).
- [2] 许正亚. 输电线路新型距离保护[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2002.
XU Zheng-ya. New Type Distance Protection of Power Line[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002.
- [3] 王为国, 尹项根, 余江, 等. 固定串补电容对输电线路继电保护影响的综述[J]. 电网技术, 1998, 22 (11): 18-21.
WANG Wei-guo, YIN Xiang-gen, YU Jiang, et al. Influence of Fixed Series Capacitors on Protective Relaying for Transmission Line[J]. Power System Technology, 1998, 22 (11): 18-21.
- [4] 王向平. 串联电容补偿线路的继电保护研究设计[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (13): 41-44.
WANG Xiang-ping. Some Suggestion Design of protection on the line With Series Compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (13): 41-44.
- [5] 胡玉峰, 陈德树, 尹项根, 等. 天平串补线路继电保护数字仿真平台德开发[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (4): 87-92.
HU Yu-feng, CHEN De-shu, YIN Xiang-gen, et al. Design of a Digital Relay Simulation Platform of the Tian-Ping Series Compensated Line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (4): 87-92.
- [6] 王为国, 尹项根, 段献忠, 等. 固定串补电容对工频故障分量继电保护的影响[J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (12): 31-33.
WANG Wei-guo, YIN Xiang-gen, DUAN Xian-zhong, et al. The Effect of Fixed Series Capacitors on Fault Component Protective Relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22 (12): 31-33.
- [7] Novosel D, Phadke A, Mohan M, et al. Problems and Solutions for Microprocessor Protection of Series Compensated Lines[J]. Developments in Power System Protection, 1997.
- [8] Cagnon C. Extensive Evaluation of High Performance Protection Relays for the Hydro-quebec Series Compensated Network[J]. IEEE Trans on PWRD, 1994; 9 (4).
- [9] Mrttila R J. Evaluation and Testing of Line Protections for Series-Compensated Transmission Lines[J]. Developments in Power System Protection, 1997.
- [10] Wilson R E. A New Method Using Relay Macromodels for Simulation of the Transient Resonse of Distance Relays, Doctoral Dissertation[D]. University of Idaho, 1992.
- [11] Erezzaghi T E, Crossley P A, Elferes R. Design and Evaluation of an Adaptive Distance Protection Scheme Suitable for Series Compensated Transmission Feeders[Z].
- [12] Buchholzer T E. Development and Validation of a Detailed Software Model for a Numerical Line Protection Relay, Doctoral Dissertation[D]. Manitoba: University of Manitoba, 2002.
- [13] CHEN Qing-hua. Interactive Distance Protection Simulation For Computer Relay Evaluation and Studies, Doctoral Dissertation[D]. Texas A&M University, 1996.

收稿日期: 2006-10-11

作者简介:

朱涛(1981-), 男, 硕士, 目前从事故障电流限制器方面的研究; E-mail: zhutao2008@gmail.com

谢小荣(1975-), 男, 博士, 副教授, 目前从事 WAMS、FACTS 等领域的研究;

祝达康(1973-), 男, 从事电力系统设计。