

复杂同塔线路继电保护动作特性仿真分析 软件的设计与开发

安然然¹,何茂慧²,王奕¹,张哲²,胡玉岚¹,唐萃²,隆茂²

(1. 广东电网公司电力科学研究院 广东省智能电网新技术企业重点实验室,广东 广州 510080;

2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要: 根据复杂同塔线路的结构特点和保护分析要求,以 PSCAD 为核心,提出了一种适用于复杂同塔结构的线路仿真模型构建方法。基于 MATLAB 环境建立专用软件模块,实现故障条件自动切换及 PSCAD 软件的循环调度控制。对仿真数据预处理和保护功能模块进行了设计。基于上述工作,开发了一套复杂同塔线路保护动作特性分析软件。工程应用实例验证了该软件的有效性和正确性。

关键词: 同塔线路; 继电保护; 动作特性; 软件设计; 仿真; 故障分析

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.08.024

0 引言

近年来,同塔输电技术以其输电走廊窄、占耕地面积小、输电容量大、投资成本低、建设速度快^[1]等优点得到了广泛应用。在工程实际中,除全程同塔双回线路外,还衍生有部分同塔、混压同塔等其他多种形式的复杂同塔线路结构^[2-5]。与全程同塔双回线路相比,复杂同塔线路的故障特性和故障类型更复杂,对线路保护的性能提出了更高要求^[6-13]。

复杂同塔线路故障特性的理论分析极为困难,即使通过复故障分析法可获得线路故障的解析表达,但由于其复杂性,也难以直接用于保护性能分析。因此,数字仿真是进行复杂同塔线路继电保护原理研究和性能评估的重要手段。国内外学者针对同塔线路结构特点,提出了多种线路模型构建方法^[14-16],但目前的研究均假设同塔各回线的导线参数相同,只适用于全程同塔等简单方式,不能直接应用于混压同塔这类导线参数不一致的复杂同塔线路。此外,故障仿真分析,特别是保护性能的评估分析需考虑不同故障点位置、不同故障类型以及不同运行方式等各种因素的影响,而同塔线路故障情况复杂,仅同塔四回线路的各种故障就有 8184 种^[17],若通过手动修改模型参数,逐个进行仿真,工作量巨大,也难以保证仿真操作的准确性。

本文根据复杂同塔线路保护分析要求,建立了同塔线路仿真系统模型,提出了一种适用于复杂同塔结构的线路仿真模型构建方法,并针对不同故障条件自动切换、仿真软件自动循环仿真以及仿真数据预处理和保护功能模块的规范设计等实现技

术问题提出了相关解决方案,工程应用实例验证了所开发的保护分析软件的有效性和正确性。

1 同塔线路仿真系统设计

1.1 同塔线路仿真系统结构

在实际工程中,由于地理环境的限制或输电特殊需求,除全程同塔双回线路外,还存在部分同塔、混压同塔等复杂结构形式。通过对现场同塔线路结构形式的调研分析,在复杂同塔线路中,部分同塔双回、同压同塔四回和混压同塔四回占主导地位。因此,为了满足不同同塔线路保护的分析要求,在仿真软件设计中,构建了图 1 所示的 4 种典型仿真系统结构模型。图 1(a)中 I、II 回线全程同塔,两端共母。与图 1(a)不同,图 1(b)中 I、II 回线在近 M 侧母线同塔架设,两回线在另一侧分别到达 N、Q 母线。图 1(c)和图 1(d)中 I、II 回线设为组 1, III、IV 回线为组 2,在虚线中间段组 1 和组 2 双回线路构成同塔四回线路。

在仿真模型中,可通过调整母线背侧等值阻抗 Z_M 、 Z_N 、 Z_P 、 Z_Q 模拟系统不同的运行方式,使用母线间阻抗 Z_{MP} 、 Z_{NQ} 、 Z_{MN} 、 Z_{MQ} 、 Z_{PQ} 来反映母线各侧外部等值系统之间电气联系的强弱。上述 4 种仿真系统结构可涵盖绝大多数常见的同塔线路形式,满足复杂同塔线路故障特性分析和保护性能评估的需求。

1.2 复杂同塔线路模型构建方法

为了适应继电保护暂态性能的分析要求,整个仿真分析软件基于 PSCAD 构成。在图 1 所示的仿真系统建模中,系统电源、联接阻抗等可直接采用 PSCAD 基本模块,难点是如何正确构建复杂同塔线路模型。

为了准确反映同塔线路结构参数的影响,同塔线路模型需采用 PSCAD 中的杆塔模型。对于全程同塔线路,由于各回线一般均采用相同型号的导线,即导线参数相同,其建模方法相对简单,两回线路采用单

收稿日期:2014-09-01;修回日期:2015-05-11

基金项目:广东电网公司电力科学研究院合作项目(ztgh-201301-001)

Project supported by the Cooperative Project of Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation (ztgh201301-001)

个杆塔模块统一构建。但对于复杂同塔线路,如混压同塔线路,由于各回线的导线参数不一致,无法通过上述方式建立线路模型,需采用新的建模方法。

针对部分同塔、混压同塔等复杂同塔方式时同

塔线路导线参数不一致的问题,可根据导线参数分组构建多个杆塔模块,通过设置对应的导线位置结构参数,使各杆塔模块相互耦合,共同组成符合工程实际的同塔线路模型。如图 2 所示,以混压同塔四

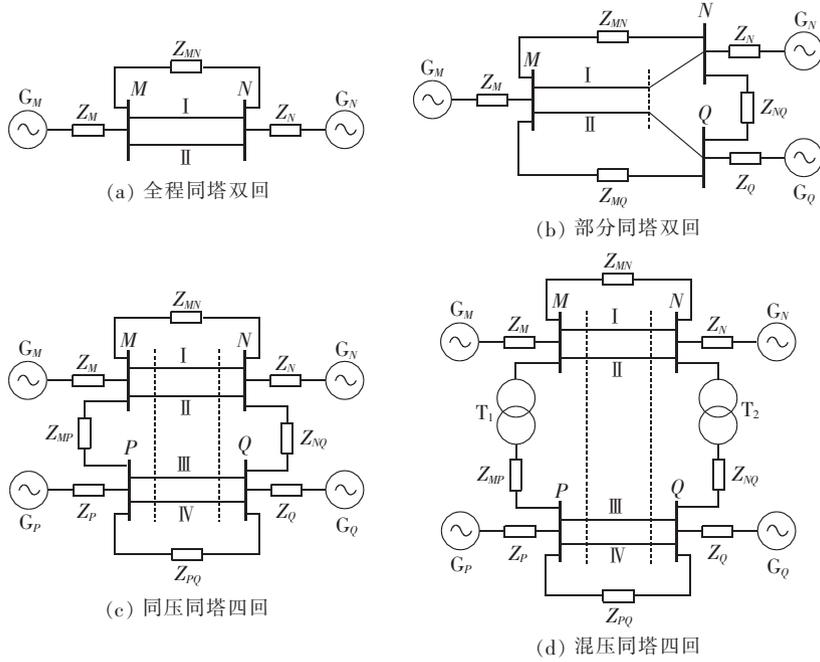


图 1 典型同塔线路系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of typical system structure of transmission lines on same tower

| Tower : 3H5 Conductors : chukar | | | | Tower Centre 0[m] Ground_Wires : 1 / 2" HighStrengthSteel | | | |
|------------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------|--|----------------------|-----------------------|--------------|
| Cond.# | Connection Phasing # | X (from tower centre) | Y (at tower) | GW.# | Connection Phasing # | X (from tower centre) | Y (at tower) |
| 1 | 1 | -9.1[m] | 66.6[m] | 1 | 13 | -16[m] | 80[m] |
| 2 | 2 | -9.6[m] | 54.4[m] | | | | |
| 3 | 3 | -10.1[m] | 42.2[m] | | | | |

| Tower : 3H5 Conductors : chukar | | | | Tower Centre 0[m] Ground_Wires : 1 / 2" HighStrengthSteel | | | |
|------------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------|--|----------------------|-----------------------|--------------|
| Cond.# | Connection Phasing # | X (from tower centre) | Y (at tower) | GW.# | Connection Phasing # | X (from tower centre) | Y (at tower) |
| 1 | 4 | 9.1[m] | 66.6[m] | 1 | 14 | 16[m] | 80[m] |
| 2 | 5 | 9.6[m] | 54.4[m] | | | | |
| 3 | 6 | 10.1[m] | 42.2[m] | | | | |

| Tower : 3H6 Conductors : chukar | | | | Tower Centre 0[m] | | | |
|------------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------|-------------------|--|--|--|
| Cond.# | Connection Phasing # | X (from tower centre) | Y (at tower) | | | | |
| 1 | 7 | -8.6[m] | 32.2[m] | | | | |
| 2 | 8 | -15.35[m] | 23[m] | | | | |
| 3 | 9 | -7.15[m] | 23[m] | | | | |

| Tower : 3H6 Conductors : chukar | | | | Tower Centre 0[m] | | | |
|------------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------|-------------------|--|--|--|
| Cond.# | Connection Phasing # | X (from tower centre) | Y (at tower) | | | | |
| 1 | 10 | 8.6[m] | 32.2[m] | | | | |
| 2 | 11 | 15.35[m] | 23[m] | | | | |
| 3 | 12 | 7.15[m] | 23[m] | | | | |

图 2 混压同塔四回杆塔模块界面

Fig.2 Interfaces of tower module for mixed-voltage four-loop transmission lines

回线路为例,若四回线导线参数不一致,可在参数编辑器中添加 4 个杆塔模块,分别对 4 个杆塔模块输入各自的导线及位置结构参数。若同压的两回线路导线参数相同,也可采用 2 个杆塔模块,每个杆塔模块按同塔双回线路模型设置,共同构成同塔四回线路。另外,通过改变线路模型接口间的连接方式,可以实现不同同塔方式,如中端同塔、送端同塔、受端同塔等仿真建模要求。

2 仿真软件的关键实现技术

2.1 自动循环仿真实现技术

如前所述,复杂同塔线路继电保护动作特性分析与评估需考虑系统运行方式、同塔线路运行方式、故障点位置、故障类型、过渡电阻等众多故障条件变化的影响,仿真的工作量巨大,如何实现不同故障条件的自动切换以及 PSCAD 软件的自动循环调度控制,是保护分析软件设计中需要重点解决的关键问题。

PSCAD 自带有 Multiple Run 功能,可以解决六变量、六测量量的多循环仿真,但由于同塔线路故障条件复杂繁多,Multiple Run 功能中变量取值有限,而且通道不足,故 PSCAD 自带的多重仿真功能不能满足应用要求。为此,本文基于 MATLAB 环境,通过编制专用软件模块,实现故障条件自动切换及 PSCAD 软件运行调度控制。

在 PSCAD 图形界面下建模后,将自动生成 psc 模型文件,该文件包含了模型内部的详细信息。故障条件的切换实际上对应的是 PSCAD 仿真模型的改变,因此,可通过修改 psc 文件来实现。psc 文件参数修改的一种直观方法是根据该参数在 psc 文件中的具体位置,通过文件指针定位移动,对其进行重新赋值。但由于同塔线路故障条件的切换涉及系统阻抗、故障点位置以及模拟不同故障类型的时控开关等众多元件参数,指针定位计算复杂,且一旦定位出现偏差,将导致模型修改错误,甚至导致仿真崩溃。进一步的研究分析发现,PSCAD 模型参数除了可使用固定数值表征外,还可将其设置为字符型的全局常量。设置的常量全部保存在 psc 文件中的子函数 Global_Consts 中。根据以上特点,可首先将 PSCAD 同塔线路模型中所有与故障条件切换相关的参数均设为全局常量。在此基础上,通过 MATLAB 写文件函数修改 psc 文件,根据所需仿真的故障条件,对 Global_Consts 中全程常量赋予不同的数值,并保持 psc 文件的其他部分不变。通过生成不同的 psc 文件,即可实现不同故障条件的自动切换。上述方法简单可靠,其生成的仿真模型与在 PSCAD 图形界面编辑的模型完全一致。psc 文件全局常量修改示例如下。

```
fprintf(fid, 'Global_Consts = \n');
fprintf(fid, '{ \n');
fprintf(fid, 'CTm = %f \n', CTm / 1000); % 互感器变比
fprintf(fid, 'CTn = %f \n', CTn / 1000);
fprintf(fid, 'PT = %f \n', PT / 1000);
fprintf(fid, 'length1 = %d \n', length1); % 分段线路长度
fprintf(fid, 'length2 = %d \n', length2);
fprintf(fid, 'length3 = %d \n', length3); % 故障点
fprintf(fid, 'length4 = %d \n', length4);
fprintf(fid, 'length5 = %d \n', length5);
fprintf(fid, 'Zm1 = %f \n', Zm1); % M 侧系统正序阻抗
fprintf(fid, 'Phm1 = %f \n', Phm1); % M 侧系统正序相角
fprintf(fid, 'Zm0 = %f \n', Zm0); % M 侧系统零序阻抗
fprintf(fid, 'Phm0 = %f \n', Phm0); % M 侧系统零序相角
fprintf(fid, 'Phasem = %f \n', Phasem); % M 侧功角
fprintf(fid, 'Zn1 = %f \n', Zn1); % N 侧系统参数
fprintf(fid, 'Phn1 = %f \n', Phn1);
fprintf(fid, 'Zn0 = %f \n', Zn0);
fprintf(fid, 'Phn0 = %f \n', Phn0);
fprintf(fid, 'Phasen = %f \n', Phasen);
fprintf(fid, 'rgd = %f \n', rgd); % 接地电阻
fprintf(fid, 'tm1 = %d \n', tmn(1)); % 线路运行方式时间控制参数
fprintf(fid, 'tm2 = %d \n', tmn(2));
fprintf(fid, 'tm1 = %d \n', tmn(3));
fprintf(fid, 'tm2 = %d \n', tmn(4));
fprintf(fid, 'tm3 = %d \n', tmn(5));
fprintf(fid, 't1A = %f \n', t_brkabc(1,1)); % 故障类型控制参数
fprintf(fid, 't1Ad = %f \n', t_brkabc(1,1));
fprintf(fid, 't1B = %f \n', t_brkabc(1,2));
fprintf(fid, 't1Bd = %f \n', t_brkabc(1,2));
fprintf(fid, 't1C = %f \n', t_brkabc(1,3));
fprintf(fid, 't1Cd = %f \n', t_brkabc(1,3));
fprintf(fid, 't2A = %f \n', t_brkabc(2,1));
fprintf(fid, 't2Ad = %f \n', t_brkabc(2,1));
fprintf(fid, 't2B = %f \n', t_brkabc(2,2));
fprintf(fid, 't2Bd = %f \n', t_brkabc(2,2));
fprintf(fid, 't2C = %f \n', t_brkabc(2,3));
fprintf(fid, 't2Cd = %f \n', t_brkabc(2,3));
fprintf(fid, 'tgd = %f \n', t_brkg(1,1));
fprintf(fid, 'tgdd = %f \n', t_brkgd(1,1));
fprintf(fid, '{ \n');
```

PSCAD 软件运行通常是通过人工操作鼠标,点击打开 PSCAD 软件、加载仿真模型、编译仿真及关闭软件等步骤实现故障仿真。为避免人工干预,提高仿真效率,可通过 MATLAB 软件模拟鼠标的上述操作步骤,对 PSCAD 进行调度控制,实现自动循环仿真。以编译仿真为例,首先控制鼠标移动到 PSCAD 软件的仿真按钮 Run,其次控制单击鼠标开始仿真。由于每次打开 PSCAD 软件后,Run 按钮的位置是固定的,因此下一次仿真时鼠标移动到指定位置的坐标保持不变,保证了程序的通用性。参照以上鼠标操作可以实现其他的仿真步骤。

由于 PSCAD 软件采用分步骤运行方式,在其循环调度控制中需要解决的另一个问题是如何实现 PSCAD 与鼠标操作时间上的同步,以保证鼠标操作前,上一步骤已经完成。在各操作步骤中,打开 PSCAD 软件、加载仿真模型、编译仿真等环节的运行时间相对固定,可通过在各个步骤之间添加固定延时来实现时间同步。但上述方式不适用于关闭软件这类鼠标操作的时间控制。由于不同故障条件的仿真完成时间存在差异,在模拟鼠标操作关闭软件前,需确保 PSCAD 已完成所有仿真计算,而若以最大仿真延时作为鼠标操作等待时间,将会导致仿真效率大幅降低,因此,需采用其他更为有效的同步控制方法。

对 PSCAD 仿真输出文件分析可知,其 .out 文件第 1 列数据记录了当前仿真时间,且该文件是随着仿真时间的推进逐行自动写入。因此,在循环控制软件设计时,可不断读入 .out 文件的第 1 行仿真时间数据,一旦该时间与预设的仿真时间相同,则表明 PSCAD 仿真计算完成,可控制鼠标关闭软件。

采用上述控制技术,可实现 PSCAD 的自动循环仿真,从而大幅提高仿真效率,并能有效避免手动修改模型参数造成的错误。

2.2 数据预处理及保护功能模块设计

PSCAD 仿真软件生成的 1 个 .out 文件只能包含 10 个输出通道数据,当输出通道大于 10 时,.out 文件依次以 _01.out、_02.out 等输出。同塔线路保护动作特性分析涉及的通道数较多,因此,在分析前需对仿真数据进行预处理,以形成规范的数据格式,以便后续保护功能模块的调用处理。

仿真数据的预处理主要包括以下基本功能。

a. 多个 .out 文件的整合。通过 MATLAB 读取多个 _xx.out 文件,并进行整合处理,分线路形成标准化的二次采样值矩。

b. 基本参数计算。对采样数据分别进行傅氏变换和对称分量变换,计算并保存保护所需的基础电气参数,如各相基频电压、电流分量、各序分量以及故障分量等,以便不同保护原理根据需要选择调用。

保护功能模块设计是整个软件设计的重要基础。由于保护厂家众多,保护原理各异,为全面评估同塔线路保护动作特性,需对不同厂家的不同保护原理分别编程实现。在保护软件开发中,借鉴了微机保护软件的模块化设计方法,将保护功能模块分为保护元件计算模块、保护动作逻辑运算模块、保护动作记录模块、仿真条件记录模块等。

a. 保护元件计算模块:仿照模拟式保护的结构特点,形成不同的“软件继电器”(保护元件)。利用已计算出的各种基础电气参数,根据各保护元件的

动作方程,进行计算判断,其结果作为逻辑量输出。保护元件主要包括各种功率方向元件、电流差动元件、阻抗元件、选相元件、振荡闭锁元件以及时间元件等。

b. 保护动作逻辑运算模块:根据保护整体动作逻辑,将相关“保护元件”的输出结果进行逻辑组合运算,以决定保护的最终动作行为。

c. 保护动作记录模块:记录各保护元件的输出逻辑结果和保护动作逻辑运算结果,并对拒动或误动的情况加以标记,以为保护动作行为分析提供依据。

d. 仿真条件记录模块:依次记录循环仿真的每一种故障条件,以便当保护误动或拒动时,可据此有针对性地开展进一步的详细仿真分析。

上述模块化设计方法,软件结构清晰,开发维护方便。在仿真软件中,设计了差动元件(分相差动、零序差动)、选相元件(单回线选相、双回线选相等)、测量阻抗元件(四边形特性、正序电压极化特性等)以及方向元件(零序方向、负序方向等),并可以根据分析需求加以扩展补充。

2.3 仿真软件基本结构

整个保护分析软件由主控模块、仿真模型自动循环控制模块、仿真数据预处理模块、保护功能模块以及输出显示模块五部分组成,其基本结构见图 3。

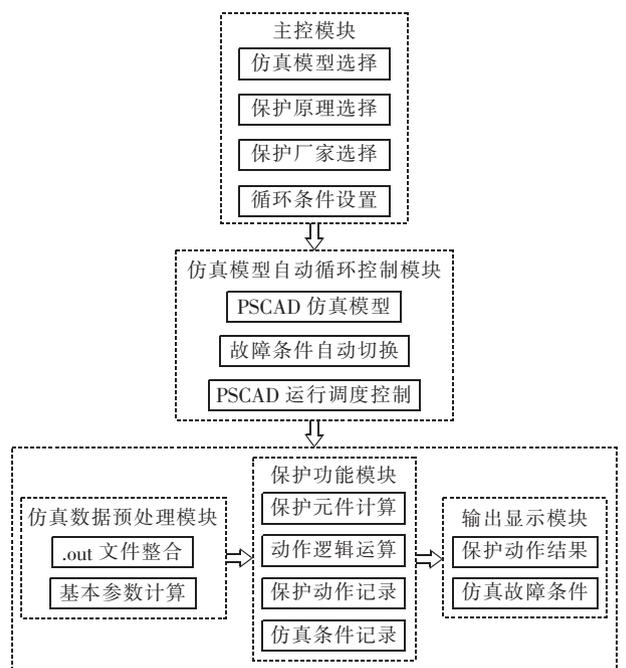


图 3 仿真软件基本结构

Fig.3 Basic structure of simulation software

通过主控模块,用户可根据分析需要选择同塔线路仿真系统类型以及被评估的保护原理。此外,为提高仿真分析效率,在主控模块中设置了“循环条件设置”功能。用户可选择包含所有故障条件的全部遍历仿真或者选择针对某类故障条件的局部重点

仿真,如可选择不同故障点位置、不同故障类型或不同运行方式等进行分类仿真。

完成主控模块设置后,软件将通过 MATLAB 自动循环控制模块实现不同的故障条件的自动切换,并模拟鼠标操作,实现 PSCAD 的运行调度控制。仿真完成后将生成统一的输出文档。用户可根据研究需求选择输出显示被分析的保护原理在各种故障条件下的动作记录数据,以便综合对比分析;也可对标记的保护拒动或误动情况,利用其对应的仿真条件记录结果,通过主控模块生成此时的仿真模型,对其故障暂态特性以及保护动作性能开展进一步的详细分析。

3 仿真测试与工程应用

仿真分析软件开发完成后,对其进行了全面的功能测试,结果表明其各项性能均达到设计要求,目前已在工程实际中得到应用,并在复杂同塔线路保护动作原理研究和适用性分析中发挥了积极作用。本节以某实际的 500 kV/220 kV 混压同塔四回线路为例,简述其仿真测试及应用结果。

3.1 线路参数介绍

线路的等效示意图如图 1(d)所示,其中 500 kV 线路采用的导线型号为 4×LGJ-630/45,220 kV 线路采用的导线型号则为 2×LGJ-630/45,子导线直径为 33.6 mm、分裂间距为 500 mm,20℃ 时直流电阻为 0.0459 Ω/km。500 kV 及 220 kV 线路地线都为 36 芯 OPGW,地线直径为 15.6 mm,20℃ 时直流电阻为 0.324 Ω/km。同塔四回段的杆塔参数及线路相序排列方式如图 4 所示,其中 G_1 、 G_2 表示架空地线,A、B、C、a、b、c 表示各相导线的相别。

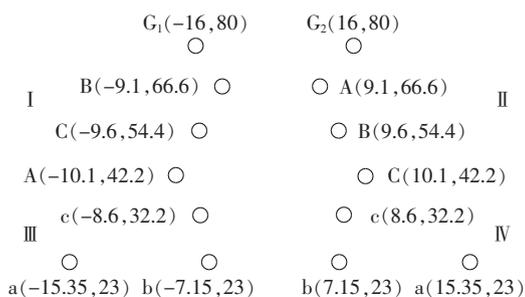


图 4 混压同塔四回线路参数

Fig.4 Parameters of mixed-voltage four-loop transmission lines on same tower

3.2 仿真验证

在仿真系统模型测试中,重点针对所提出的复杂同塔线路建模方法的正确性进行了验证分析。由于与保护分析相关的线路基本参数是正序、负序和零序阻抗参数,而正序与负序阻抗基本相同,因此仿真验证中模拟现场参数测量方法,分别测试线路末端短路时首端的正序、零序等值阻抗,并将仿真测试结果与现场的实测结果进行对比分析,其中 I 回线的对

比结果如表 1 所示。

表 1 I 回线正序、零序阻抗参数对比结果
Table 1 Comparison of positive- and zero-sequence impedance parameters for loop I

| 参数 | 参数值 / ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$) | | 测量阻抗 误差 / % |
|------|---|---------------------|----------------|
| | 仿真结果 | 实测结果 | |
| 正序阻抗 | 0.26 \angle 87.3° | 0.27 \angle 87.0° | -3.7 |
| 零序阻抗 | 0.75 \angle 78.7° | 0.71 \angle 78.4° | 5.6 |

从表 1 可知,正序、零序测量阻抗与实测结果的相对误差在 6% 以内,均处于合理范围。测量误差主要是由于仿真模型中的某些设置参数,如土壤电阻率等与现场运行实际电阻率有关,难以准确给定。上述对比结果表明,所采用的同塔线路模型构建方法正确,满足工程应用要求。

由于保护动作特性仿真分析涉及不同保护原理、不同运行方式、不同故障类型以及不同故障点位置等诸多因素,受文章篇幅所限,难以详细展开分析,将另文详细说明。表 2—4 给出的是仿真故障条件、某厂家用于全程同塔双回线路的距离保护选相元件和接地距离 II 段的仿真结果。由表 3 可以看出,全程同塔双回线路选相元件不能直接应用于混压同塔线路,在发生跨线故障时存在误选相情况。表 4 为 III 回线 P 侧保护安装处的接地距离 II 段在不同跨线接地故障下的动作结果。可以看出,在跨线故障情况下,正序电压极化的接地阻抗继电器的整体性能优于四边形特性的接地阻抗继电器,但 2 种阻抗继电器

表 2 仿真故障条件
Table 2 Fault conditions for simulation

| 故障条件 | 输出结果 |
|---------|-----------------|
| 系统运行方式 | M-强 N-强 P-强 Q-强 |
| 同塔四回段占比 | 70% |
| 线路运行方式 | 四回线同时运行 |
| P | 50% |
| 接地电阻 | 0 |
| 故障类型 | 所有 |

注:强表示强电源;p 为故障点位置和 M 侧电源的距离占 I 回线全长的百分比。

表 3 不同故障类型下 I 回线的选相结果
Table 3 Results of phase selection of loop-I for different fault types

| 故障类型 | 选相结果 | | |
|-------------|----------|----------|------------|
| | I 回线 M 侧 | I 回线 N 侧 | I 回线综合选相结果 |
| IAG | AG | AG | AG |
| IBC | BC | BC | BC |
| IA IIAG | AG | AG | AG |
| IB III CG | BG | BG | BG |
| I A IV B | AG | AG | F |
| I A II ABG | AG | AG | AG |
| I AC III A | CG | CG | F |
| I AC II ABG | ACG | ACG | ACG |
| I B II BVCG | BG | BG | BG |

注:选相结果中 F 表示误选相。

表 4 不同接地故障下Ⅲ回线 P 侧接地距离保护Ⅱ段动作结果

Table 4 Operational results of zone-II of grounding distance protection at side P of loop-III for different grounding faults

| 故障类型 | 动作结果 | |
|---------|-------|----------|
| | 四边形特性 | 正序电压极化特性 |
| ⅢAG | A | A |
| I AⅢAG | N | N |
| ⅢAⅣAG | A | A |
| I BⅢCG | N | C |
| I ACⅢAG | N | A |
| I BCⅢAG | A | A |

注:动作结果中,N表示拒动,A、C表示距离保护动作的相别。

在某些跨线故障下仍存在拒动问题。根据输出结果记录的仿真故障条件(见表 2)做进一步的仿真分析,结果表明造成混压跨线接地故障保护拒动的主要原因是上述跨线故障会导致测量阻抗幅值显著增大,或相角发生严重偏移,具体见表 5,分析结论可为距离保护的性能改善和工程应用提供重要参考。

表 5 Ⅲ回线 P 侧故障相测量阻抗结果
Table 5 Measured impedances of faulty phase at side P of loop-III

| 故障类型 | 测量阻抗 | |
|---------|-------|--------|
| | 幅值/% | 相角/(°) |
| I AⅢAG | 154.7 | 47.0 |
| I BⅢCG | 35.9 | 127.8 |
| I ACⅢAG | 92.5 | 116.9 |

注:幅值为测量阻抗与Ⅲ回线正序阻抗的比值。

4 结语

数字仿真是进行复杂同塔线路继电保护原理研究和性能评估的重要手段。本文根据同塔线路的结构特点和保护分析要求,以 PSCAD 为核心,开发了一套复杂同塔线路保护动作特性仿真分析软件,具有以下特点:

a. 构建的 4 种典型仿真系统结构模型可涵盖绝大多数常见的同塔线路形式,满足复杂同塔线路故障特性分析和保护性能评估的要求;

b. 同塔线路模型构建方法较好地解决了导线参数不一致时的建模问题,能准确模拟部分同塔、混压同塔等各种复杂同塔线路的参数特性;

c. 自动循环仿真技术可实现不同故障条件的自动切换及 PSCAD 软件的自动调度控制,大幅提高了仿真效率,并能避免手动修改模型参数造成的错误;

d. 保护软件采用模块化设计方法,开发维护方便,并易于功能扩展,为复杂同塔线路保护原理研究和性能评估提供了有力的分析工具。

参考文献:

[1] 康小宁,梁振锋. 同杆平行双回线路保护及自动重合闸综述[J]. 继

电器,2004,32(23):72-76.

KANG Xiaoning,LIANG Zhenfeng. Survey on the protective relaying and autoreclosure for double-circuit lines on the same tower[J]. Relay,2004,32(23):72-76.

[2] 班连庚,王晓刚,白宏坤,等. 同塔架设的 220 kV/500 kV 输电线路感应电流与感应电压仿真分析[J]. 电网技术,2009,33(6):45-49.

BAN Liangeng,WANG Xiaogang,BAI Hongkun,et al. Simulative analysis of induced voltages and currents among multi circuit 220 kV and 500 kV transmission lines on same tower[J]. Power System Technology,2009,33(6):45-49.

[3] 唐文秀,饶亦军,赵志江,等. 非均匀同杆并架双回线路故障定位[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):81-84.

TANG Wenxiu,RAO Yijun,ZHAO Zhijiang,et al. Fault locating of irregular parallel overhead double line[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(5):81-84.

[4] 张晓,贾振宏,吴锁平,等. 500/220 kV 混压同塔四回线路电磁环境的仿真分析[J]. 电网技术,2010,34(5):207-211.

ZHANG Xiao,JIA Zhenhong,WU Suoping,et al. Simulation analysis on electromagnetic environment of quadruple-circuit transmission lines belonging to different voltage classes on the same tower[J]. Power System Technology,2010,34(5):207-211.

[5] 张晓,周浩,赵斌赋,等. 500 kV 同塔四回输电线路最优相序布置[J]. 中国电力,2010,43(2):44-47.

ZHANG Xiao,ZHOU Hao,ZHAO Bincai,et al. Research on optimized phase sequence arrangements for 500 kV quadruple-circuit transmission line on the same tower[J]. Electric Power,2010,43(2):44-47.

[6] 王向平,徐磊,张晓秋. 同塔并架四回线中线路保护的适应性[J]. 电力系统自动化,2007,31(24):80-85.

WANG Xiangping,XU Lei,ZHANG Xiaoqi. Line protection feature study on adaptation to four-circuit transmission lines on a same tower[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(24):80-85.

[7] 曾耿晖. 同塔线路故障分析及其对继电保护影响研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.

ZENG Genghui. Fault analysis and its influence on relay protection of transmission lines on same tower[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2012.

[8] 张颖,邵能灵. 同塔四回线接地距离保护分析[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(12):1-6.

ZHANG Ying,TAI Nengling. Analysis of ground distance protection for quadruple-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control,2010,38(12):1-6.

[9] 陈桥平,蔡泽祥,刘为雄,等. 同杆线路跨线故障对选相元件的影响机理[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):95-98.

CHEN Qiaoping,CAI Zexiang,LIU Weixiong,et al. Influence of inter-line fault on phase selection element for parallel lines on same pole[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):95-98.

[10] 王兴国,周泽昕,杜丁香. 不同电压等级同塔多回输电线路零序功率方向元件动作行为分析[J]. 电网技术,2011,35(12):235-242.

WANG Xingguo,ZHOU Zexin,DU Dingxiang. Behavior analysis of zero-sequence power direction component for multi-circuit transmission lines in different voltage classes on same tower[J]. Power System Technology,2011,35(12):235-242.

- [11] 舒巧俊,范春菊. 同杆 4 回线与单回线构成的 T 型线路故障测距新方法[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):75-79.
SHU Qiaojun,FAN Chunju. Fault locating of T-type transmission line consisting of single-line and four-parallel-line[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):75-79.
- [12] 赵凯超,周泽昕,杜丁香. 不同电压等级同塔四回输电线路不同运行方式下零序互感对接地距离保护的影响[J]. 电网技术,2010,34(12):193-197.
ZHAO Kaichao,ZHOU Zexin,DU Dingxiang. Influence of zero-sequence mutual inductance on earth-fault distance protection for four-circuit transmission lines belonging to different voltage classes on same tower under different operation modes [J]. Power System Technology,2010,34(12):193-197.
- [13] 马晓明,范春菊,刘玲. 跨电压等级同杆四回线接地距离保护的研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(24):28-34.
MA Xiaoming,FAN Chunju,LIU Ling. Ground distance protection for four joint transmission lines with different voltage grades on the same tower[J]. Power System Protection and Control,2011,39(24):28-34.
- [14] 余涛,叶文加,梁海华. 同杆并架输电线路的停运线路合闸 EMTDC 仿真分析[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(23):159-163.
YU Tao,YE Wenjia,LIANG Haihua. EMTDC simulation of outage line closing for transmission circuits lines parallel connection on single tower[J]. Power System Protection and Control,2010,38(23):159-163.
- [15] 朱忠烈,李建华,祝瑞金,等. 同塔 4 回线故障和暂态仿真分析方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(8):49-54.
ZHU Zhonglie,LI Jianhua,ZHU Ruijin,et al. Common tower quadruple circuits fault and transient simulation analysis method [J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(8):49-54.
- [16] 周冠波,李晓华,蔡泽祥,等. 同杆多回线路不平衡问题分析与对策[J]. 电力系统自动化,2010,34(16):58-63.
ZHOU Guanbo,LI Xiaohua,CAI Zexiang,et al. Analysis and countermeasures for the unbalance problem of multi-parallel line on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(16):58-63.
- [17] 田羽,范春菊,龚振东. 同杆 4 回线 12 序分量法[J]. 电力系统自动化,2007,31(21):35-39.
TIAN Yu,FAN Chunju,GONG Zhendong. A study on twelve-sequence component method of four-parallel lines on same towers[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(21):35-39.

作者简介:



安然然

安然然(1985—),女,河北石家庄人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统仿真分析、二次设备检测(E-mail:anranran85@163.com);

何茂慧(1990—),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护与控制(E-mail:mhh0510@126.com);

张哲(1962—),男,湖南株洲人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统继电保护、新能源及超导技术(E-mail:zz_mail2002@163.com)。

Design and development of operational characteristics simulation & analysis software for relay protections of complex transmission lines on same tower

AN Ranran¹,HE Maohui²,WANG Yi¹,ZHANG Zhe²,HU Yulan¹,TANG Cui²,LONG Mao²

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Smart Grid Technology, Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the structural characteristics of complex transmission lines on same tower and according to the demands of protective analysis, a suitable construction method of line simulation model with PSCAD as its core is proposed. The special software modules are established in the MATLAB environment to realize the automatic switching among different fault conditions and the control of PSCAD loop schedule while the preprocessing module of simulation data and the protective functional modules are designed, based on which, the operational characteristics simulation and analysis software for the relay protections of complex transmission lines on same tower is developed. Its validity and correctness are verified by the engineering applications.

Key words: transmission lines on same tower; relay protection; operational characteristics; software design; computer simulation; failure analysis