基于波形相关性的混压同塔四回线故障选相新方案

郑 涛1,于 湖1,吴建云2,罗美玲2

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206;2. 国网宁夏电力公司,宁夏 银川 750001)

摘要:为了解决混压同塔四回线故障情况复杂、发生跨电压故障时无法应用单回线故障选相方法的难题,提 出一种基于波形相关性的选相新方案。针对故障相电流相角和幅值的变化情况,提出了波形自相关系数和 改进自相关系数判据识别故障相。为防止在强磁耦合场景下错误选相的发生,总结各类故障时电流序分量 的特征,进一步提出了电流序分量辅助选相判据,对可能出现的错误选相情况进行再判定。基于PSCAD/ EMTDC对混压同塔线路的各类故障进行大量仿真,仿真结果验证了所提故障选相方案的可行性。 关键词:混压同塔四回线;继电保护;故障选相;波形自相关系数;改进自相关系数;序分量

中图分类号:TM 77 文献标志码:A DOI:10.16081/j.epae.202008014

0 引言

随着土地资源日趋紧张、输电容量增大,混压同 塔四回线输电技术迅速发展^[1-2],其特有的跨电压故 障使得故障电气量呈现出新特性^[3]。另外,混压同 塔四回线的结构较为紧凑,四回线的线间和相间磁 耦合较强,发生短路故障后,故障电流增大的同时会 增加磁耦合联系,在考虑保护元件动作情况时不可 忽略强磁的影响^[45]。正确选相是距离保护和按相 重合闸可靠动作的重要前提,实现正确选相具有重 要意义^[6]。

现有的混压同塔多回线故障分析方法主要可分 为两大类:一类是通过矩阵解耦变换形成的独立序 分量法,另一类是利用故障边界条件对经典序网图 进行改进形成的改进序网图法。对于独立序分量 法,文献[7]针对同杆双回线分解出独立的6序分 量,文献[8]在其基础上结合传统的对称分量法,利 用12序分量实现了同塔四回线的解耦;对于改进序 网图法,文献[9]利用两系统跨电压故障点处电压相 等的条件,将两系统故障序网图相连,并对零序电流 进行解耦,构造出复合序网图。基于上述故障分析 方法,部分学者对故障选相开展了相关研究:文献 [10] 通过四回线线路参数解耦矩阵, 求得故障相的 双同及双反相量,依据其幅值和相角特性识别故障 相;文献[11]利用相线解耦法对参数不对称的同塔 四回线解耦,通过不同故障下穿越量与环流量的差 异实现选相。实际上参数不对称的混压同塔四回线

收稿日期:2019-11-10;修回日期:2020-06-15

基金项目:国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项 (2016YFB0900600);国家电网公司科技项目(52094017000W) Project supported by the Key Project of Smart Grid Technology and Equipment of National Key Research and Development Plan of China(2016YFB0900600) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52094017000W) 阻抗解耦过程较繁琐,计算较为复杂。文献[12]在 利用改进复合序网对四回线路解耦后指出,在强磁 耦合下相电流差突变量选相元件的适应性与两系统 特殊相电源的相角差有关,可能出现错误选相。

本文基于各类故障下故障相电流的基本特征, 即故障发生后电流相角和幅值的变化趋势,依据数 字信号处理中皮尔逊信号相关性的基本原理提出利 用相电流的波形自相关系数和改进自相关系数,分 别反映电流相角和幅值的变化情况。针对参数对称 的输电线路,考虑到混压同塔四回线间存在的强磁 联系可能使非故障相的相角和幅值发生突变,为防 止将非故障相错误选为故障相,综合考虑跨电压故 障和非跨电压故障下的序电流特性,提出序分量辅 助选相法,对可能出现的错误选相情况进行再判定。

1 混压同塔四回线故障电流特性分析

混压同塔四回线发生跨电压不接地故障时的示 意图如图1所示。图中,高电压等级系统用系统Ⅰ 表示,其故障线路的三相标注为A、B、C;另一个电压 等级系统用系统Ⅱ表示,其故障线路的三相标注为 a、b、c;K_i(*i*=A,B,C,a,b,c)为各相到故障点的开关, K_i闭合的不同组合分别代表不同类型的故障;U_i、I_i 分别为线路故障点相电压、电流;U_i为短路点的对地



图 1 混压同塔四回线跨电压不接地故障示意图 Fig.1 Diagram of mixed-voltage four-circuit lines on same tower when cross-voltage ungrounded-fault occurs

电压。以 I A-Ⅱ a(系统 I 的 A 相跨越系统 Ⅱ 的 a 相 发生不接地故障,其他故障表述方法类似)、I BC-Ⅱ a 和 I ABC-Ⅱ a 故障为例,讨论系统 I 故障回线的序 电流和相电流特性。系统 Ⅱ 的分析方法类似。

混压同塔四回线短路故障按是否发生在同一电 压等级内,可分为非跨电压和跨电压故障2类,其中 跨电压故障按是否接地又分为跨电压接地和不接地 故障。当混压同塔四回线发生非跨电压故障时,故 障回线的故障特性与传统单回线故障特性相同^[13]; 当发生不同电压等级间的跨电压接地故障时,可以 看作是2个电压等级系统分别发生接地故障^[9],故障 特性与传统单回线故障特性相同;当发生不同电压 等级间的跨电压不接地故障时,故障点将2个不同 电压等级系统相连,为短路电流提供新通路,需重新 讨论故障电流特性。故本文以跨电压不接地故障为 主,讨论故障特性。

1.1 序电流故障特性分析

根据现有的改进复合序网法^[9],系统 I 发生 A 相、BC两相、ABC 三相跨电压不接地故障时,系统 I 故障回线的序网图如图 2 所示。图中以 A 相为特殊 相, U_{1A}、U_{2A}、U_{0A}分别为正序、负序、零序电压; I_{1A}、 I_{2A}、I_{0A}分别为正序、负序、零序电流; Z₁, Z₂₁、Z₀₁分 别为系统 I 的正序、负序、零序阻抗; E_A为 A 相电源 电动势。



图 2 系统 I 不同相发生跨电压不接地故障时的序网图 Fig.2 Sequence network diagram of System I when

cross-voltage ungrounded-fault occurs on different phases

系统 Ⅱ发生 a 相跨电压不接地故障时的序网图 如图 3 所示。利用故障点处对地电压 U_k相等的原则,将图 2 中的点*m*、*n*分别与图 3 中的点*m*′、*n*′相连,即组成发生 I A-Ⅱ a、I BC-Ⅲ a、I ABC-Ⅲ a 故障时





Fig.3 Sequence network diagram of System II when cross-voltage ungrounded-fault occurs on phase a

的复合序网图[9],图中变量定义可参考图2。

由图2、3可以列写序电流表达式,限于篇幅,以 相对复杂的 I BC-Ⅱ a 故障为例,系统 I 故障回线的 序分量表达式如式(1)所示。发生 I A-Ⅲ a 以及 I ABC-Ⅲ a 故障时的序电流表达式分别见附录中的 式(A1)和式(A2)。

$$\begin{cases} I_{1.A} = (E_A/Z_{\Sigma I} - I_{0.A})/2 \\ I_{2.A} = (-E_A/Z_{\Sigma I} - I_{0.A})/2 \\ I_{0.A} = -(E_A + E_A/2)/(Z_{\Sigma I} + Z_{\Sigma I}) \end{cases}$$
(1)

其中, $Z_{\Sigma I}$ 、 $Z_{\Sigma I}$ 分别为 I、II回线内正序、负序、零序 阻抗之和。

由式(1)可知,此时系统 I 的故障序边界条件与 单回线的两相不接地故障序边界条件不同,存在零 序电流分量,且正序电流和负序电流幅值不相等。

对于 I A- II a、I ABC- II a故障同样采用上述分 析方法,可知发生 I A- II a故障时,系统 I 的故障回 线中存在零序电流,且正、负序电流幅值相等;发生 I ABC- II a故障时,系统 I 的故障回线仅含正序和 零序电流分量^[9]。

1.2 相电流故障特性分析

限于篇幅,同样以相对复杂的 IBC-II a故障为 例,假设 E_A = 500 $\angle 0^\circ$ kV、 E_a = 220 $\angle 90^\circ$ kV,系统 I 的 故障相的电流相量图如图4所示。发生 I ABC-II a 故障时,故障相的电流相量图见附录A中的图A1。



(b)相电流相量图

图4 发生 [BC- Ⅱ a 故障时系统] 故障相的电流相量图

Fig.4 Phasor diagrams of fault phase of System I when I BC-II a fault occurs

由图4可见,两故障相的电流幅值差异较大,相 电流相突变量选相元件可能错选为C相单独故障。 但B相电流幅值较故障前仍有变化,且除幅值特征 外,故障相相角与两系统特殊相电源的相角差有关。 对于 I A-II a、I ABC-II a故障,同样采用上述 相量分析法,可知发生 I A-II a故障时,故障相A相 仍有较大的电流幅值;发生 I ABC-II a故障时,由图 2可知故障回线内除含有受本回线电源影响的正序 电流分量外,同时含有受另一故障回线电源影响的 零序电流分量,当两故障回线电源间相角改变时,正 序和零序电流分量间的相角也随之改变^[9],故与单 回线三相故障不同,此时三相故障电流幅值不相等。

由以上分析可知,发生跨电压故障时的故障相 电流特性与传统单回线故障电流特性存在差别。但 结合非跨电压故障特征^[13]可知,不论发生何种故障, 故障后相电流幅值和相角的变化会使得故障前、后 电流波形的形态差异较大。

2 基于波形相关性的故障选相原理

由1.2节分析可知,发生各类故障后,故障相由 于相角和幅值的突变,与故障前电流波形的形态相 差较大,结合线性变量间的相关性原理,提出基于波 形相关性的故障选相原理。

2.1 皮尔逊相关系数原理

相关系数是最早由统计学家卡尔·皮尔逊设计 的统计指标,是研究变量之间线性相关程度的量^[14]。 皮尔逊相关系数定义如式(2)所示。

$$r(X,Y) = \frac{\text{COV}(X,Y)}{\sqrt{V_{\text{ar}}(X)V_{\text{ar}}(Y)}} = \frac{V_{\text{ar}}(X+Y) - V_{\text{ar}}(X) - V_{\text{ar}}(Y)}{2\sqrt{V_{\text{ar}}(X)V_{\text{ar}}(Y)}}$$
(2)

其中,COV(X,Y)为变量X与Y的协方差; $V_{ar}(X)$ 、 $V_{ar}(Y)$ 分别为X、Y的方差;r(X,Y)为变量X与Y的相 关系数, $r(X,Y) \le 1$,其值越接近1,2个变量的相关程 度越大,r(X,Y) > 0表示正相关,r(X,Y) < 0表示负 相关。

经电流互感器二次侧采样后的离散电流信号, 同样可以采用式(3)计算某个信号与其经过延迟后 的信号的相关性,并以此作为保护方案的依据。以 信号*X*采样后的方差为例,可采用式(3)进行计算。

$$V_{\rm ar}(X) = \frac{\sum_{j=1}^{1/4} (X_j/\overline{X})^2}{T/T_s}$$
(3)

其中,T为保护判别所采用的数据窗长度,可取1个 周期长度; T_s 为采样步长; X_j 为第j次采样的数值; \overline{X} 为T时间段内采样值的平均值。协方差计算方法类 似,本文不再赘述。

2.2 自相关系数和改进自相关系数原理

针对故障后波形相角和幅值的变化,分别提出 波形自相关系数和改进自相关系数加以识别。

自相关是指信号在一段时间内的值与另一段时间内的值之间的依赖关系,是对一个信号的时域描

述。此处引用皮尔逊自相关系数 $r_{\varphi}(\varphi=A,B,C,a,b,c)$ 表示相邻2个相电流周波间的线性关系,计算公式如式(2)所示,变量X、Y分别为 φ 相相邻的前、后2个电流周波,可分别用 $A\sin(\alpha+\omega t)$ 和 $B\sin(\alpha+\omega t+\beta)$ 表示。由于故障后,故障相电流相角可能会发生突变,与故障前一个电流周波产生相角差,即 $\beta\neq 2k\pi$ $(k=0,1,2,\cdots)$,使得X、Y之间的相关性降低, r_{φ} 接近于1。因此,自相关系数可较灵敏地识别相角发生突变的故障相。

图5为正弦波形在1个周期后相角发生突变(相 移角β=60°)的波形图,为便于对相邻2个电流周波 进行比较,将前一电流周波延时1个周期,如图5中 虚线部分所示。由图5可见,相角发生突变前后,两 波形的相关性降低,当相移角β=90°时,相关性为0, 自相关系数与波形幅值无关。



Fig.5 Comparison between waveforms before and after change of phase angle

考虑到存在故障后相角未发生突变,而仅幅值 突变的故障相电流,此时β=2kπ(k=0,1,2,…)且A≠ B,无法利用自相关系数将其与非故障相电流进行 区分,故进一步引入改进自相关系数r'。。改进自相 关系数在自相关系数的基础上引进相邻2个电流周 波的幅值差,以体现幅值的变化对自相关系数的影 响,计算公式如式(4)所示。

$$r'_{\varphi} = \frac{r_{\varphi}}{\frac{T_{s}}{T} \sum_{i=1}^{T/T_{s}} |i_{\varphi_{i,q}} - i_{\varphi_{i,h}}|}$$
(4)

其中,*i_{φin}*和*i_{φin}*分别为故障前和故障后1个周期的电流采样值。当其电流波形不存在相角差异,即*r_φ=1*时,故障相前、后两周期的电流幅值的差值越大,*r'_φ*越接近0,非故障相的*r'_φ*则远大于1。因此,改进自相关系数可较灵敏地识别出波形自相关系数无法识别的仅电流幅值发生突变的故障相。

图 6 为正弦波形在 1 个周期后幅值发生突变 (B=4A)的波形图,为便于对相邻 2 个电流周波进行 比较,将前一电流周波延时 1 个周期,如图 6 中的虚 线波形所示。由图 6 可知,幅值发生突变后,突变前 后两波形的相关性降低,此时自相关系数为 1,改进 自相关系数小于 1。



图 6 幅值发生突变前后波形对比图 Fig.6 Comparison between waveforms before and after change of amplitude

3 基于波形相关性的故障选相方案

3.1 相关系数法选相方案

电流波形的自相关和改进自相关系数可以从相 角和幅值两方面共同确定故障相,两者结合可以提 高故障选相的可靠性。电流波形的自相关系数计算 简单,有助于实现保护速动性。故首先采用波形自 相关系数对各相电流进行判定,对自相关系数判定 为非故障相的相再采用改进自相关系数进一步确 认。此方法适用于包括跨电压故障在内的任何故障 类型的选相,且发生跨电压故障时,不需要跨线信息 交互。相关系数法选相流程如附录中的图A2所示。 选相步骤简述如下。

(1)依据三相电流波形自相关系数 r_e判定疑似 故障相。对于 r_e < r_{set}(r_{set}为整定值)的相,认定该相电 流相角发生了较大变化,判定其为疑似故障相,其他 相判定为疑似非故障相。

(2)依据改进自相关系数 r'_{\$}补充判定疑似故障相。对于 r'_{\$} < r'_{set}(r'_{set}为整定值)的相,认定该相电流 幅值突变量大于正常电流波动范围,补充判定该疑 似故障相。

(3)利用辅助判据对强磁耦合影响下可能出现 误判的情况进行再判定。考虑强磁影响,可能出现 将正常运行、单相故障、两相故障误选为三相故障的 情况,此时需对三相疑似故障相的情况利用序分量 法进行辅助判定,对应图 A2 中红色虚线框内的部 分,该部分将在3.2节详述。

3.2 序分量辅助选相方案

考虑强磁耦合的影响,可能出现故障后非故障 相电流波形变化的情况,为防止相关系数选相法发 生错误选相,需进行辅助判定。由于三相参数对称, 同一回线内的非故障相都会受到零序互感的影响, 当零序互感影响足够大时,每相非故障相都会发生 波形的改变,故仅可能出现将单相故障、两相故障误 选为三相故障的情况。由于受互感影响的非故障相 与故障相差异仍较大,故障边界条件仍如1.1节所 示,故可采用序边界条件特征进行辅助选相。当图 A2所示相关系数法选相流程判定为三相疑似故障 相时,结合故障相数不同时的序分量特征并留有一 定裕度,序分量辅助选相流程如附录中的图A3所 示,具体步骤如下。 (1)判别是否发生非对称性故障:判断该回线内的负序电流是否超过定值,若超过则判定为发生非对称性故障,进入判定步骤(3),否则进入判定步骤(2)。

(2)判别是否发生三相故障:判断三相电流幅值 是否均超过定值,若是则判定为三相故障,否则认定 该三相电流因受到线间强磁联系影响而产生波动, 判定为未发生故障。

(3)判别非对称故障的故障相数:记录三相电流 幅值并进行比较,若正序、负序、零序电流幅值相近, 则判定相电流幅值较大的一相发生单相故障,否则 判定相电流幅值较大的两相发生两相故障。

波形相关系数选相与序分量辅助选相相结合的 选相方法可以弥补仅利用幅值特性选相方案的不 足,如相电流差突变量选相、相电流突变量选相;其 中波形相关系数选相动作逻辑简单,所需判断周期 短,且对于包括非跨电压故障在内的大部分磁耦合 影响较小的故障类型均可以不依靠辅助判据独立完 成选相。

4 仿真验证

在 PSCAD 仿真软件中搭建混压同塔四回线 跨电压故障模型,参数设置为:线路长度为 300 km; 系统 I 的电压等级为 500 kV,输电线单位长度正序 阻抗、零序阻抗分别为 0.009+j0.260 Ω / km、0.268+ j1.023 Ω / km,同一电压等级线间单位长度零序互 感阻抗为 0.259+j0.763 Ω / km,两端电源正序阻抗、 零序阻抗分别为 j18 Ω 、j54 Ω ;系统 II 的电压等级为 220 kV,输电线单位长度正序阻抗和零序阻抗分别 为 0.042+j0.283 Ω / km、0.269+j1.162 Ω / km,两端 电源正序阻抗、零序阻抗分别为 j70 Ω 、j93 Ω ,同一 电压等级线间单位长度零序互感阻抗为 0.227+ j0.880 Ω / km,不同电压等级线间单位长度零序互 感阻抗为 0.243+j0.678 Ω / km。

4.1 跨电压故障下的电流特性仿真验证

以系统 I 为例,给出 PSCAD 仿真中,强磁联系 下的混压同塔四回线路的10%处发生单相、两相、 三相跨电压不接地故障时故障回线的各相电流波 形图。

发生 I A-II a 故障时各相电流波形对比图如图 7所示。图中,虚线波形为正常运行时的相电流,实 线波形为在0.08 s 发生故障情况下的相电流,后同。 由图 7 可见,故障前实线与虚线重合,发生故障后, 故障相A 相的电流波形在相角和幅值上均与故障前 存在较大差异,故障前后的波形相关性较低;非故障 相 B 相和C 相的故障后电流波形受零序互感影响波 形发生较小变化,但电流幅值远小于故障相。

发生 IBC-II a故障时各相电流波形如图 8 所示。由图可见,发生 IBC-II a故障时,系统 I的B、C



142

图7 发生 IA-II a 故障时系统 I 的各相电流波形图

Fig.7 Phase current waveforms of System I when I A-II a fault occurs





相电流的相角和幅值在故障前后均存在较大差异, 故障前后的波形相关性较低,而非故障相A相由于 零序互感的影响,故障后幅值稍有变化,故障前后波 形自相关系性仍较大。

发生 I ABC- II a故障时,各相电流波形如图9所示。由图9可见,发生 I ABC- II a故障时,系统 I 的 A、B、C 相故障后的电流幅值不再相等,且与故障前 的电流波形相比,故障后电流在相角幅值上的差异 较大、相关性低,与1.1节中的理论分析结果一致。

4.2 选相方案可行性的仿真验证

限于篇幅,选取跨电压故障中的典型故障,给出



图 9 发生 I ABC-Ⅱ a故障时系统 I 的各相电流波形 Fig.9 Waveform of System I when I ABC-Ⅱ a fault occurs

故障情况严重的线路的10%处发生故障时系统 I 的选相结果如表1所示。因为只有当相关系数法判 定为三相故障时才需进行序分量辅助判定,表1中 对无需辅助判定的情况用"一"表示。非跨电压故障 以及线路其他位置发生故障时的选相结果见附录 表A1。

由表1可见,发生各类故障时非故障相的波形 自相关系数接近于1,但考虑互感影响等因素留有 适量裕度,可设置自相关系数的整定值为0.9;由于 非故障相故障前后电流幅值差异较小,其改进自相 关系数远大于1,而故障相的自相关系数小于1,故 可取改进自相关系数的整定值为1。发生两相跨电 压故障时,当其中一相故障相的电流幅值较小时,相 电流差突变量选相可能出现错误选相的情况;发生 IABC-IIa故障时,由于系统 I的故障回线内含有 负序分量,传统序分量选相适应性降低,无法正确选 相。对于上述情况,波形自相关系数和改进自相关 系数相结合的选相方案具有较强适应性,均可正确 选相。

以自相关系数和改进自相关系数判据可能发生 误判的 I A-II a 故障为例,对辅助判据的定值确定原 则以及具体执行情况进行简要说明。当由于强磁影 响将系统 I 发生单相故障判为疑似三相故障后,进

		表1	不同	跨电压胡	友障し	「系统Ⅰ的	故	障回线说	也相结果		
Table 1	Phase	selection	result	of fault	line	of System	Ι	during	different	cross-voltage	faults

						5	-	0		8	
故障	É	1相关系数		改ì	进自相关系	《数	相关系数	序分量	综合选	相电流差突变	故障序分量
类型	r _A	r _B	r _c	$r'_{\rm A}$	$r'_{\rm B}$	$r_{ m C}'$	选相结果	选相结果	相结果	量选相结果	选相结果
I A-Ⅲa	-0.2474	0.8565	0.5565	-0.0065	2.9375	4.1878	ABC 三相 故障	A相 故障	正确 选相	正确选相	正确选相
I BC-Ⅱa	0.9872	0.7579	-0.8430	49.0258	0.6467	-0.2929	BC 两相 故障	_	正确 选相	误选为 C相	误判为 BC-g故障
I ABC-II a	-0.4848	-0.6352	-0.8596	-0.0127	-0.4556	-0.2108	ABC 三相 故障	ABC三相 故障	正确 选相	误选为 AC两相	失效
I A-II a-g	-0.6294	0.9125	0.9652	-0.0265	35.5262	15.2656	A相 故障	_	正确 选相	正确选相	正确选相
I BC-II a-g	0.9486	0.2659	-0.6798	35.4284	0.1806	-0.0482	BC 两相 故障	_	正确 选相	正确选相	正确选相

143

入辅助判别,首先判断其回线内负序电流超过整定 值,故为非对称故障,然后判定回线内正序电流与负 序电流幅值,两者近乎相等,此时比较三相电流幅 值,判定幅值最大的相即A相为故障相。关于整定 值的设定,附录表A2给出了系统内负序电流分量以 及各相电流幅值。结合仿真结果与发生故障时各序 电流表达式^[9]可知,各类非对称故障发生时,故障回 线负序电流分量均较大,而发生对称故障时负序电 流接近0,故负序电流整定值可参考现有负序保护 定值的设定^[15],取为负荷电流的6%即可区分对称 故障与非对称故障。

对于非全程同塔的情况,线路间强磁耦合较小, 理论上有利于电流波形的自相关和改进自相关选相 正确动作,限于篇幅,本文仅针对强磁影响严重的全 程同塔情况进行了仿真,所述选相方法在非全程同 塔线路中的适应性仍有待进一步研究。

5 结论

本文针对混压同塔四回线发生跨电压故障时相 电流差突变量选相元件适应性不足这一问题,分析 了发生不同类型故障时的电流序分量和相量特征, 提出了以波形相关性判定为主、序分量判定为辅的 综合选相方案,所得主要结论如下:

(1)发生跨电压故障后序分量和相量特征与传统电气特征差异较大,除相电流差突变量选相元件外,故障序分量选相元件也会出现适应性不足的问题;

(2)基于故障前、后电流波形相关性较低的基本 故障特征,提出了由电流波形自相关和改进自相关 系数组成的选相方案;

(3)针对强磁耦合导致的误选相问题,进一步提 出了序分量辅助选相方案,仿真结果表明,以波形相 关性判定为主、序分量判定为辅的综合选相方案能 够快速正确地识别各类故障时的故障相。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]于仲安,毕俊强,郭培育,等.同塔四回输电线路故障选线新方案[J].电力自动化设备,2019,39(11):127-132.
 YU Zhongan, BI Junqiang, GUO Peiyu, et al. New fault line selection scheme for four-circuit transmission lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(11): 127-132.
- [2]郑涛,张嘉琴,吴丹,等. 混压部分同塔双回线跨电压故障短路 计算[J]. 电工技术学报,2018,33(11):2496-2507.
 ZHENG Tao,ZHANG Jiaqin,WU Dan,et al. Cross-voltage shortcircuit calculation of mixed-voltage double-circuit lines partly on the same tower[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(11):2496-2507.
- [3] 刘欣,黄少锋,张鹏,等. 混压同塔线路跨电压不接地短路时 低压系统过电压计算[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):

116-120.

LIU Xin, HUANG Shaofeng, ZHANG Peng, et al. Overvoltage calculation of low-voltage system for mixed-voltage on same tower transmission lines under unearthed cross-voltage fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1):116-120.

[4] 王艳,刘美岑,陈旭,等.中性点不同接地方式下混压部分同
 塔双回线路故障分析[J].电力自动化设备,2018,38(10):
 159-165.

WANG Yan, LIU Meicen, CHEN Xu, et al. Fault analysis of mixed-voltage double-circuit lines partly on same tower under different grounding modes of neutral point[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10):159-165.

[5]郑涛,吴丹,张嘉琴,等. 混压同塔四回线强电弱磁系统跨电 压不接地故障短路计算[J]. 电力系统自动化,2017,41(15): 155-161.

ZHENG Tao, WU Dan, ZHANG Jiaqin, et al. Short-circuit calculation of cross-voltage unearthed fault in strong-electric and weak-magnetic system of mixed-voltage four-circuit lines on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15):155-161.

[6]陈文哲,郝治国,张保会,等.同塔双回线纵向故障特征分析 及零序方向保护改进[J].电力自动化设备,2016,36(11): 133-139.

CHEN Wenzhe, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Characteristic analysis on longitudinal fault of dual-circuit transmission line and improvement of zero-sequence directional protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11):133-139.

- [7] 索南加乐,葛耀中,陶惠良,等.同杆双回线的六序选相原理
 [J].中国电机工程学报,1991,11(6):3-11.
 SUONAN Jiale,GE Yaozhong,TAO Huiliang, et al. The micro-processor based fault phase indicator for the double circuit line on the same tower using six sequence components[J].
 Proceedings of the CSEE,1991,11(6):3-11.
- [8] FAN Chunju, LIU Ling, TIAN Yu. A fault-location method for 12-phase transmission lines based on twelve-sequence-component method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1):135-142.
- [9] ZHENG Tao, ZHANG Jiaqin, WU Dan, et al. Cross-voltage short circuit calculation for mixed-voltage quadruple-circuit lines on the same tower[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(9):2342-2350.
- [10] 李博通,李永丽,张朝乾. 基于电流双反相量的同杆四回线故 障选相方法[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(22):38-45.
 LI Botong, LI Yongli, ZHANG Zhaoqian. A new fault phase detection algorithm for four-circuit transmission lines on the same tower based on double-differential phasors of fault currents[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 38-45.
- [11] 刘琦,邰能灵,范春菊,等. 基于单端电气量的不对称参数同塔四回线选相方法[J]. 电工技术学报,2016,31(4):178-186.
 LIU Qi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Fault phase selection scheme for quadruple-circuit transmission lines with asymmetrical parameter based on single-ended electrical quantities
 [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31 (4):178-186.
- [12] ZHANG Jiaqin, ZHENG Tao, WU Qiong, et al. Adaptability of phase selectors based on phase-to-phase superimposed currents when confronting cross-voltage faults in mixed-voltage quadruple-circuit line system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(13): 3242-3247.
- [13] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版 社,2010:15-17.

(下转第149页 continued on page 149)

Influence of bifurcation theory based load model on voltage stability of AC / DC hybrid system

LI Wenqiao, WANG Zhenshu, LI Zhongqiang

(College of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In order to research the influence of regional load model on voltage stability of AC / DC hybrid power system, a mathematical model considering the dynamic characteristics of each component in the system is established by taking a 3-generator 9-bus AC / DC hybrid power system as an example. The system equilibrium solution manifold is tracked by combining bifurcation theory with continuation method of local parameterization, and the saddle node bifurcation and Hopf bifurcation which affect system stability are searched and detected. On this basis, the influence of different load growth modes on voltage stability is researched, and the differences of load models adopted by the dispatching departments and planning departments in each regional power grid of State Grid Corporation of China are emphatically analyzed and compared. The research shows that the system static and dynamic load margins are the smallest when the load is increased by the year-on-year growth of the whole grid load, which is most unfavorable to the system stability. With the increasing proportion of induction motor in the load model, the bifurcation boundary curve moves forward, the occurrence time of each kind of bifurcation point is shortened, the system voltage stability margin is reduced, and the voltage stability will be more threatened.

Key words: bifurcation theory; voltage stability; AC / DC hybrid system; load model; equilibrium solution manifold

(上接第143页 continued from page 143)

- [14] PEARSON K. Note on regression and inheritance in the case of two parents[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1895,58(1):240-242.
- [15] 曹红日,米建宾,于壮壮,等. 负序电流保护的整定计算和配置 方案探讨[J]. 华北电力技术,2017(5):20-26.
 CAO Hongri, MI Jianbin, DING Zhuangzhuang, et al. Discussion on setting calculation and configuration scheme of negative sequence current protection[J]. North China Electric Power,2017(5):20-26.

作者简介:



郑 涛(1975—),男,山东济南人,教 授,博士研究生导师,通信作者,研究方向为 电力系统保护与控制(E-mail:zhengtao_sf@ 126.com);

于 溯(1995—),女,黑龙江牡丹江人, 硕士研究生,研究方向为电力系统保护与 控制(E-mail:1182201309@ncepu.edu.cn)。 (编辑 任思思)

郑 涛

Novel scheme of fault phase selection for mixed-voltage four-circuit lines on same tower based on waveform correlation

ZHENG Tao¹, YU Su¹, WU Jianyun², LUO Meiling²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China)

Abstract: In order to solve the problem of complicated fault situation of mixed-voltage four-circuit lines on same tower and the problem that single-line fault phase selection method cannot be applied during cross-voltage fault, a new phase selection scheme based on waveform correlation is proposed. According to the change of the phase angle and amplitude of the fault phase current, the waveform autocorrelation coefficient and the improved autocorrelation coefficient are respectively proposed. To prevent the occurrence of misselection of phase in the strong magnetic coupling scene, the current sequence components of various faults are summarized, then the current sequence component-assisted phase selection is proposed to re-determine the possible mis-selection phase. Based on PSCAD / EMTDC, a large number of simulations are carried out for various faults of lines on same tower with mixed-voltage, and the simulative results verify the feasibility of the proposed fault phase selection scheme.

Key words: mixed-voltage four-circuit lines on same tower; relay protection; fault phase selection; waveform autocorrelation coefficient; improved autocorrelation coefficient; sequence components

附录

IA-IIa 故障时,系统 I 故障回线的序分量表达式如式(A1)所示。

$$\begin{cases} I_{1.A} = (E_A - E_a) / (Z_{\Sigma I} + Z_{\Sigma II}) \\ I_{2.A} = I_{1.A} \\ I_{0.A} = I_{1.A} \end{cases}$$
(A1)

IABC-IIa 故障时,系统 I 故障回线的序电流表达式如式(A2)所示。

$$\begin{cases} I_{1.A} = -E_A / Z_{1.I} \\ I_{2.A} = 0 \\ I_{0.A} = E_a / (Z_{\Sigma II} + Z_{0.I.e}) \end{cases}$$
(A2)

IABC-IIa 故障时系统 I 故障相电流相量图如图 A1 所示。





Fig.A1 Phasor diagram of fault phase of system I when the I ABC-IIa fault occurs







图 A3 序分量法辅助选相流程图

Fig.A3 Assisted phase selection flow chart of sequence component method

表 A1 不同故障位置时系统 I 故障回线的故障选相结果

TableA1 Fault phase selection result of fault line of System I when fault occurs in different positions

故障	故障位		自相关系数		Ę	女进自相关系	数	相关系数	序分量	综合
类型	置/%	r _A	r _B	r _C	r' _A	r' _B	r'c	选相结果	选相结果	选相结果
	10	-0.7781	0.9986	0.9787	-0.0209	41.7146	13.1974	A 相故障	_	正确选相
IA-g	50	-0.9769	0.9985	0.9983	-0.1821	47.2792	27.0823	A 相故障		正确选相
	90	-0.6542	0.9794	0.9713	-0.0210	61.6817	64.1501	A 相故障	_	正确选相
	10	0.9924	-0.6890	-0.8235	35.5461	-1.4465	-0.2907	BC 相故障	_	正确选相
IBC-g	50	0.9993	-0.9005	-0.9748	12.2755	-0.1256	-0.1169	BC 相故障	—	正确选相
_	90	0.9903	-0.5660	-0.7814	43.5583	-1.1883	-0.7977	BC 相故障	_	正确选相
	10	-0.7901	-0.7704	-0.7786	-0.1276	0.0000	-0.2252	ABC 故障	ABC 故障	正确选相
IABC-g	50	-0.9927	-0.9951	-0.9925	-0.0941	-0.1583	-0.0931	ABC 故障	ABC 故障	正确选相
	90	-0.7133	-0.7017	-0.7231	-0.4859	0.0000	-0.6220	ABC 故障	ABC 故障	正确选相
	10	-0.2474	0.8565	0.5565	-0.0065	2.9375	4.1878	ABC 故障	A 相故障	正确选相
IA-IIa	50	-0.9974	0.8921	0.1513	-0.2489	3.8634	1.9678	ABC 故障	A 相故障	正确选相
	90	-0.2474	0.7325	0.2623	-0.0065	3.9375	2.3878	ABC 故障	A 相故障	正确选相
	10	0.9872	0.7579	-0.8430	49.0258	0.6467	-0.5929	BC 相故障	_	正确选相
IBC-IIa	50	0.9958	-0.7926	-0.9045	54.4198	-0.1002	-0.1228	BC 相故障	_	正确选相
	90	0.9318	0.7700	-0.8102	58.0291	0.6571	-0.6452	BC 相故障	_	正确选相
	10	-0.4848	-0.6352	-0.8596	-0.0127	-0.4556	-0.2108	ABC 故障	ABC 故障	正确选相
IABC-IIa	50	-0.9950	-0.9885	-0.9956	-0.0895	-0.1513	-0.0789	ABC 故障	ABC 故障	正确选相
	90	-0.4315	-0.3917	-0.8288	-0.0135	-0.2810	-0.0985	ABC 故障	ABC 故障	正确选相
	10	-0.6294	0.9125	0.9652	-0.0265	35.5262	15.2656	A 相故障	—	正确选相
IA-IIa-g	50	-0.2546	0.9916	0.9912	-0.0762	45.2500	22.6391	A 相故障	—	正确选相
	90	-0.1996	0.9981	0.9797	-0.911	`5.1696`	2.5370	A 相故障	—	正确选相
	10	0.9486	0.2659	-0.6798	35.4284	0.1806	-0.0482	BC 相故障		正确选相
IBC-IIa-g	50	0.9982	-0.2758	-0.8251	30.3583	-0.0419	-0.0630	BC 相故障	—	正确选相
	90	0.9985	-0.2348	-0.8071	34.8279	-0.0585	-0.1022	BC 相故障	—	正确选相

表 A2 跨电压故障时系统 I 故障回线负序电流和各相电流幅值情况

故 谙	相电流帧	畐值与负荷	皆电流比			
おい音玄式リー						
成座大王	A相 B相		C 相	负序电 流幅值与负荷电流比		
IA-IIa	4.299	1.023	1.029	1.096		
IBC-IIa	1.008	14.970	18.578	6.292		
IABC-IIa	18.551	18.455	18.735	0		
IA-IIa-g	4.341	1.022	1.015	1.462		
IBC-IIa-g	1.013	14.774	19.128	6.296		

TableA2 Amplitude of each phase current and negative sequence current of

System I fault line when cross-voltage fault occurs