

中性点不同接地方式下混压部分同塔双回线路故障分析

王 艳¹, 刘美岑¹, 陈 旭¹, 刘俊德², 焦彦军¹

(1. 华北电力大学 电力工程系, 河北 保定 071003;

2. 国网鞍山市供电公司, 辽宁 鞍山 114001)

摘要:在序分量法的基础上,对变电站近区出现的中性点直接接地和非直接接地混压部分同塔双回线路跨线故障进行分析。消除混压同塔线路间的零序互感,将系统解耦为综合正、负、零序网;根据三绕组变压器接线方式对综合正、负、零序网的公共阻抗部分进行幅值与相角的校正,得到中性点不同接地方式下混压部分同塔双回线路的独立六序网;根据故障类型列出故障点边界条件,通过复合序网及求解方程组得到故障点短路电流。通过PSCAD软件对一中性点不同接地方式混压部分同塔双回线系统(220 kV/110 kV/35 kV)各种故障进行仿真验证,结果表明所提故障计算方法的精确性及实用性。

关键词:中性点接地方式;混压部分同塔双回线;三绕组变压器;六序网;跨线故障

中图分类号:TM 76

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.025

0 引言

随着我国经济的发展进步,输电走廊的不断建设和耕地资源保护的矛盾成为制约我国电网发展的主要瓶颈,导致变电站近区输电线路并排及交叉跨越的情况越来越多,不同电压等级跨线故障时有发生。输电线路电压等级、中性点接地方式的不同及线间耦合的影响给输电线路的故障分析及保护带来困难。因此,对变电站近区出现的中性点不同接地方式下混压部分同塔双回线的跨线故障分析,具有重要的理论价值与现实意义。

对于同电压等级同塔双回线路的跨线故障,目前已经有较为完善的故障分析方法,例如适用于参数对称线路的六序分量法^[1-2]和适用于参数不对称线路的新六序分量法^[3]。对于不同电压等级同塔双回线路跨线故障的研究,目前主要分为两大类:一类是改进六序分量法^[4-6],该方法将双回线路解耦为6个独立序网络并且同时对两侧系统阻抗进行修正,然后通过复合序网图或解方程法求取故障电流,但是该方法在分析计算过程中没有考虑不同电压等级间变压器的影响,且阻抗修正系数的求取需要借助仿真测量值,而实际中该测量值是无法得到的;另一类是基于多复合序网图的短路电流计算方法^[7-9],该方法将混压同塔线路分为强电弱磁系统和弱电强磁系统进行跨线故障分析,分别求取2个系统各自的故障电流后再利用叠加原理得到故障相故障电流,该方法在强电弱磁系统中考虑了变压器的影响,但将变压器等效成电流源,电流源数值设定为发生故

障后流过变压器的电流测量值,在实际应用中无法实现。

综上所述,现有混压同塔双回线路故障电流的计算方法均需要借助故障时刻的相关测量值,实用性受到限制,且现有方法都是针对中性点直接接地系统的混压双回线路。随着输电线路的不断增多,同一变电站中性点直接接地系统及不直接接地系统的混压同塔输电线路广泛存在,而针对中性点不同接地方式下的混压输电线路跨线故障分析还尚未涉及。鉴于此,本文针对中性点不同接地方式下混压部分同塔双回线路的跨线故障进行研究。首先,通过对称分量法将混压系统分解为综合正、负、零序网,然后消除零序网中的线间互感,得到解耦后的混压系统综合正、负、零序网;然后,针对不同的变压器接线方式,对系统综合序网中的公共阻抗部分进行幅值与相角的校正,得到混压部分同塔双回线路的独立六序网;最后针对不同的混压部分同塔双回线路跨线故障类型,列写故障点原始边界条件,通过复合序网图及求解方程组的方法得到故障点电流值。本文方法原理简单,思路清晰,仿真结果验证了其准确性。

1 中性点不同接地方式下混压部分同塔双回线路六序网

图1为具有强电联系的中性点不同接地方式混压部分同塔双回线路系统图。图中,I、II回线为双回线路同塔部分,III、IV回线为双回线路非同塔部分,2回线路参数不对称;同一变电站不同电压等级的2条出线经一三绕组变压器相连,变压器一、二次绕组为星形接地(Yg)连接,三次侧绕组为三角形(Δ)连接,即I、III回线为中性点直接接地系统,II、IV回线为中性点非直接接地系统; E_{sM} 、 E_{sNI} 、 E_{sNII}

收稿日期:2017-08-22;修回日期:2018-07-01

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016-MS90)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2016MS90)

Fig.1 System diagram of mixed-voltage double-circuit lines partly on same tower under different grounding modes of neutral point

利用对称分量法得到的中性点不同接地方式下混压部分同塔双回线路的综合正、负、零序网络如图 2 所示。图中, $z_{sM i}$ 、 $z_{sN I}$ 、 $z_{sN II}$ 分别为电源 E_{sM} 、 $E_{sN I}$ 、 $E_{sN II}$ 的等效各序阻抗; $z_{1 i}$ 、 $z_{2 i}$ 、 $z_{3 i}$ 为变压器三绕组的各序阻抗; $z_{I i}$ 、 $z_{II i}$ 为同塔双回线路各序阻抗; $z_{III i}$ 、 $z_{IV i}$ 为非同塔双回线路各序阻抗; $I_{M i}$ 、 $I_{N I i}$ 、 $I_{N II i}$ 为流过相应线路的各序电流; 下标 $i=1$ 、 $i=2$ 、 $i=0$ 分别对应正序、负序和零序, 各序网中 i 的取值不同, 具体参照图 2; z_p 为同塔双回线间互感; k 为故障点到变压器侧同塔线路长度占同塔线路全长的百分比。由于两回线路的电压等级不同, 为方便计算, 在后续分析中各参数均用标幺值表示。

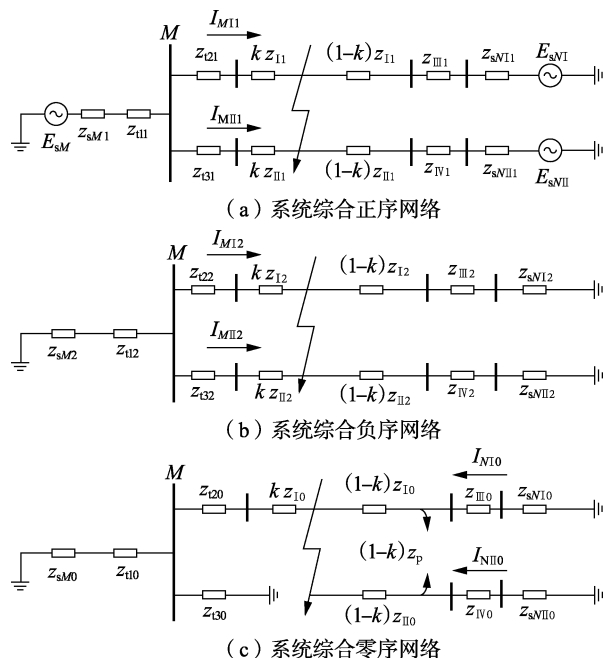


Fig.2 Integrated positive-,negative- and zero-sequence networks of system

接地,即Ⅱ回线故障点与 M 侧变压器间线路无零序电流通,无需考虑线间零序互感,其零序互感只存在于故障点与 N 侧系统间的同塔线路中。通过等值变换即可消去零序网络线间互感,得到解耦后的系统综合零序网络如图 3 所示。

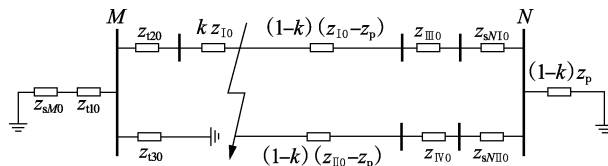


Fig.3 Decoupling integrated zero-sequence network

图1所示混压系统为中性点不同接地方式下具有强电联系的混压部分同塔双回线路,2回线路通过三绕组变压器连接,为了得到各回线路独立的正、负、零序网络,需要考虑变压器绕组接线方式的不同,对线路外侧变压器绕组及电源侧的公共阻抗进行幅值与相角的校正,将综合序网进一步解耦成独立的六序网络。

在图 2(a)的基础上,要将混压系统综合正序网络分解为 I、II 回线路各自独立的正序网络,则需对 M 侧公共阻抗 $z_{M1} = z_{sM1} + z_{11}$ 部分进行校正。由于三绕组变压器接线方式的不同,故需对 I、II 回线路的正序网络公共阻抗进行幅值与相角的校正。校正后的 I、II 回线路独立正序网络如图 4 所示,图中, k_{11} 、 k_{12} 分别为 I、II 回线路正序阻抗校正系数; U_{11} 、 U_{12} 和 I_{11} 、 I_{12} 分别为 I、II 回线路故障点处的正序电压和正序电流。由于 I 回线路为中性点直接接地系统,变压器一、二次侧绕组接线方式相同,故二次侧电流不存在相角差;而变压器三绕侧组为三角形接线,II 回线路为中性点非直接接地系统,故变压器的一、三次绕组侧电流存在相角差,一次侧正序电流滞后三次侧正序电流的角度为 α 。则 k_{11} 、 k_{12} 的计算公

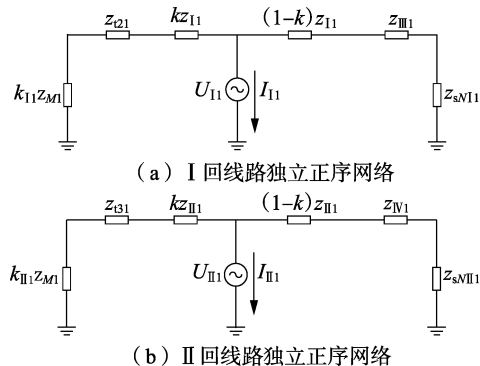


Fig.4 Independent positive-sequence networks of Line I and II

式为:

$$k_{I1} = 1 + \frac{I_{M11} e^{-j\alpha}}{I_{M11}}, \quad k_{II1} = 1 + \frac{I_{M11}}{I_{M11} e^{-j\alpha}}$$

其中, I_{M11} 、 I_{M11} 可由故障边界条件及相应回路方程求得。

1.2.2 混压部分同塔双回线路负序校正网

对于 I、II 回线路负序网络的校正过程可参照正序网络,区别在于变压器一次侧负序电流超前三次侧负序电流 α ,图 5 给出校正后的 I、II 回线路独立负序网络。图中, U_{12} 、 U_{II2} 和 I_{12} 、 I_{II2} 分别为 I、II 回线路故障点处的负序电压和负序电流; k_{12} 、 k_{II2} 分别为 I、II 回线路负序阻抗校正系数。

$$k_{12} = 1 + \frac{I_{M12} e^{j\alpha}}{I_{M12}}, \quad k_{II2} = 1 + \frac{I_{M12}}{I_{M12} e^{j\alpha}}$$

其中, I_{M12} 、 I_{M12} 可由故障边界条件及相应回路方程求得。

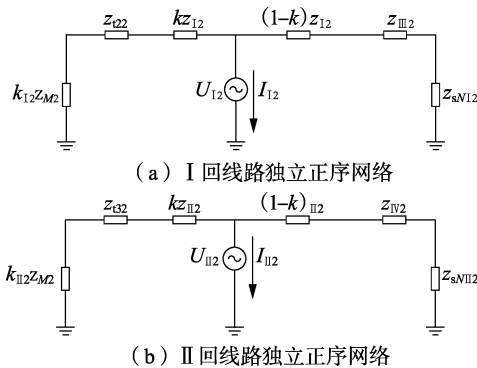


图 5 I、II 回线路独立负序网

Fig.5 Independent negative-sequence networks of Line I and II

1.2.3 混压部分同塔双回线路零序校正网络

由图 3 给出的系统解耦后综合零序网络可知,由于 II 回线路为中性点非直接接地系统,所以 II 回线路的独立零序网络与变压器侧阻抗无关,只需对综合零序网络中系统 N 侧的公共互感阻抗部分进行校正即可。图 6 给出了 I、II 回线路各自独立的零序网络,图中, $z_{M0} = (z_{sM0} + z_{t10}) // z_{t30}$; U_{10} 、 U_{II0} 和 I_{10} 、 I_{II0} 分别为 I、II 回线路故障点处的零序电压和正序电流; k_{10} 、 k_{II0} 分别为 I、II 回线路的零序阻抗校正系数。

$$k_{10} = 1 + \frac{I_{N10}}{I_{N10}}, \quad k_{II0} = 1 + \frac{I_{N10}}{I_{N10}}$$

其中, I_{N10} 、 I_{N10} 可由故障边界条件及相应回路方程求得。

综上所述,可得到 I、II 回线路从故障点看进去的各自独立序阻抗 Z_{10} 、 Z_{11} 、 Z_{12} 、 Z_{II0} 、 Z_{II1} 、 Z_{II2} ,为后续故障电流的计算奠定基础。

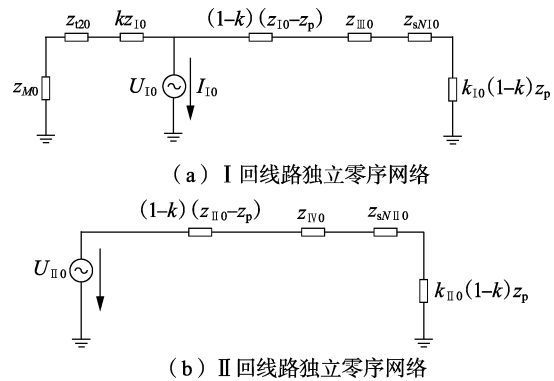


图 6 I、II 回线独立零序网

Fig.6 Independent zero-sequence networks of Line I and II

2 中性点不同接地方式下混压部分同塔双回线路跨线故障计算

中性点不同接地方式下混压部分同塔双回线发生跨线故障时,根据故障类型列写 I、II 回线路原始故障边界条件,利用本文得到的故障点六序网等效阻抗,可以计算得到故障点各序电流的数值,并画出复合序网图。

2.1 混压部分同塔双回线路跨线接地故障

以 I A-II A-G(金属性接地故障)为例,阐述混压部分同塔双回线路跨线接地故障短路电流计算过程。

列写图 1 所示系统发生 I A-II A-G 故障时,故障点的原始边界条件为:

$$\begin{cases} U_{IA} = 0, I_{IB} = I_{IC} = 0 \\ U_{IIA} = 0, I_{IIB} = I_{IIC} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, U_{IA} 、 U_{IIA} 分别为 I、II 回线故障点处的 A 相电压; I_{IB} 、 I_{IIB} 和 I_{IC} 、 I_{IIC} 分别为 I、II 回线故障点处 B 相和 C 相电流。

根据原始边界条件转换得到的序量关系如式(2)所示。

$$\begin{cases} I_{I1} = I_{I2} = I_{I0} \\ I_{II1} = I_{II2} = I_{II0} \\ U_{I0} + U_{I1} + U_{I2} = 0 \\ U_{II0} + U_{II1} + U_{II2} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)所示的序量关系可以画出 I A-II A-G 故障点处的复合序网图如图 7 所示,同时解得 I 回线路和 II 回线路故障点处的故障电流正序分量分别为:

$$I_{I1} = \frac{E_I}{Z_{10} + Z_{11} + Z_{12}}, \quad I_{II1} = \frac{E_{II}}{Z_{II0} + Z_{II1} + Z_{II2}}$$

其中, E_I 、 E_{II} 分别为 I、II 回线正常运行时的相电压。将求得的电流正序分量代入式(2)依次得到其

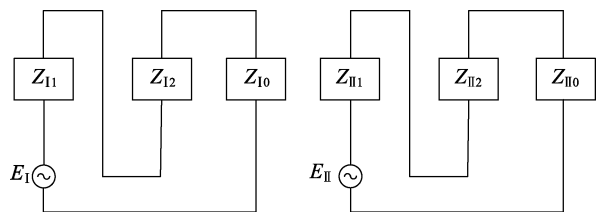


图 7 IA-IIA-G 故障复合序网图

Fig.7 Composite sequence network of IA-IIA-G fault

他各序电流。最后将所得序电流经过对称分量法变换即可求出故障点处相电流值。

同理可得到其他跨线接地故障复合序网图,由于篇幅限制,仅给出 I A-II B-G 故障复合序网如图 8 所示。

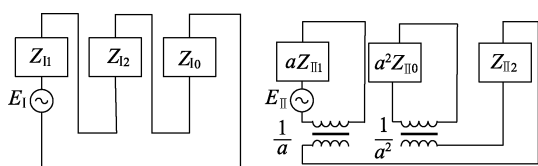


图 8 IA-II B-G 故障复合序网图

Fig.8 Composite sequence network of IA-II B-G fault

2.2 混压部分同塔双回路跨线不接地故障

中性点不同接地方式下混压部分同塔双回路发生跨线不接地故障时, I、II 回路在故障点处存在电气联系,使得故障相电压有名值相等,故障相电流有名值之和为 0。由于本文计算过程中各电气量均采用标么值,因此需将有名值故障边界条件转换为标么值下的故障边界条件。下面以 IB-II C 故障为例,阐述计算过程。

图 1 所示系统发生 IB-II C 故障时,故障点的有名值原始故障边界条件为:

$$\begin{cases} U_{IB} = U_{IC} \\ I_{IB} + I_{IC} = 0 \\ I_{IA} = I_{IC} = I_{IIA} = I_{IIB} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, U_{IB} 、 U_{IC} 分别为 I 回路故障点处的 B 相电压和 II 回路故障点处的 C 相电压; I_{IA} 、 I_{IIA} 分别为 I、II 回路故障点处 A 相电流。

将式(3)转化为标么值下的故障边界条件如式(4)所示。

$$\begin{cases} tU_{IB} = U_{IC}, I_{IB} + tI_{IC} = 0 \\ I_{IA} = I_{IC} = tI_{IIA} = tI_{IIB} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, t 为两系统基准电压的比值。

根据标么值原始边界条件转换得到序量关系为:

$$\begin{cases} I_{I0} = -taI_{II1}, I_{II1} = -ta^2I_{II1}, I_{I2} = -tI_{II1} \\ I_{II0} = aI_{II1}, I_{II2} = a^2I_{II1} \\ -ta^2U_{I0} - taU_{I1} - tU_{I2} + a^2U_{II0} + U_{II1} + aU_{II2} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)求得 II 回路故障点的故障电流正序分量为:

$$I_{II1} = \frac{E_{II} - taE_I}{Z_{II0} + Z_{II1} + Z_{II2} + t^2(Z_{I0} + Z_{I1} + Z_{I2})}$$

其中, $a = e^{j120^\circ}$ 。将 II 回路电流正序分量代入式(5)依次得到其他各序电流后即可求出故障点处相电流值。

图 9 为根据式(5)中序电压、序电流之间关系画出的 IB-II C 故障复合序网。序电压关系决定各序序网的串并联方式,序电流关系决定各序中序阻抗系数。以 II 回路负序网为例:电压前系数用理想变压器变比表示,为满足式(5)中各序电压串联关系不变,则需保证 II 回路负序电压 U_{II2} 恒定,即有 $U_{II2} = Z_{II2}I_{II2} = Z_{II2}a^2I_{II1}$ 。由于理想变压器的变比为 $1/a$,则理想变压器的电流变比为 a ,即 $I'_{II2} = aI_{II1}$,此时 $U_{II2} = I'_{II2}Z'_{II2} = Z'_{II2}aI_{II1} = Z_{II2}a^2I_{II1}$,求解得到 $Z'_{II2} = aZ_{II2}$ 。同理可对其他序阻抗参数进行校正。

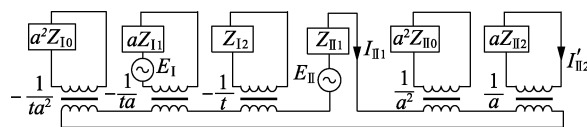


图 9 IB-II C 故障复合序网图

Fig.9 Composite sequence network of IB-II C fault

同理可得到其他跨线不接地故障复合序网图,由于篇幅限制,仅给出 IA-II B-C 故障的复合序网图如图 10 所示。

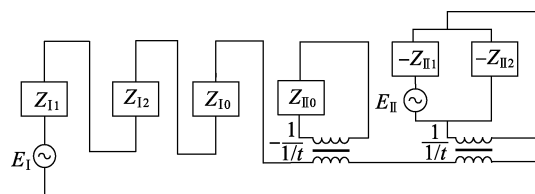


图 10 IA-II B-C 故障复合序网图

Fig.10 Composite sequence network of IA-II B-C fault

3 仿真验证

在 PSCAD 仿真软件中搭建如图 1 所示的中性点不同接地方式混压部分同塔双回路模型。模型参数如下:变压器容量为 120 MV·A,变比为 242 kV/121 kV/38.5 kV,采用 Yg/Yg/d-11 接线方式;各电压等级电源侧正、负序阻抗为 $j50 \Omega$,零序阻抗为 $j80 \Omega$;110 kV 线路正、负序单位长度线路阻抗为 $0.028\ 23 + j0.421\ 2 \Omega/\text{km}$,零序单位长度线路阻抗为 $0.264\ 8 + j1.18 \Omega/\text{km}$;35 kV 线路正、负序单位长度线路阻抗为 $0.028\ 59 + j0.421\ 2 \Omega/\text{km}$,零序单位长度线路阻抗为 $0.276\ 9 + j1.173\ 8 \Omega/\text{km}$;同塔线路零序单位互感阻抗为 $0.081\ 49 + j0.267\ 7 \Omega/\text{km}$ 。同杆线

路长度为 100 km,非同杆线路长度为 50 km。根据上述模型参数,对于不同故障类型,结合本文所提故障分析方法,求得故障电流并与仿真值进行对比分析。

表 1—4 分别列出中性点不同接地方式下混压部分同塔双回线路发生跨线接地故障和跨线不接地故障时,分别考虑计及同杆部分互感影响和无互感影响时,利用本文故障计算方法与仿真得到的故障相电流幅值与相角的对比分析结果。

由表 1—4 可知,对于中性点不同接地方式下混压部分同塔双回线路发生各种类型跨线故障时,在不考虑同杆部分线间互感影响时,对某些故障类型(如 IA-ⅡABC-G、IA-ⅡBC)计算结果与仿真值相比在幅值及相角误差偏差过大;而计及互感影响时,计算得到的故障点短路电流与仿真结果相比在幅值与相角上误差均很小,故为了保证故障短路电流计算的准确性,应考虑同杆部分互感的影响。

表 1 接地短路故障电流幅值的计算和仿真值对比

Table 1 Comparison between calculative and simulative results of grounding fault current amplitudes

故障类型	故障电流	仿真值/kA	计算值/kA		误差/%	
			计及互感影响	未计及互感影响	计及互感影响	未计及互感影响
IA-ⅡA-G	I_{IA}	1.710 5	1.700 2	1.701 9	0.602 2	0.502 7
	I_{IIA}	0.171 3	0.174 7	0.213 7	1.984 8	24.741 8
IA-ⅡBC-G	I_{IA}	1.714 2	1.706 8	1.700 6	0.431 7	0.793 4
	I_{IIB}	0.873 3	0.876 4	0.880 7	0.357 9	0.847 4
	I_{IIC}	0.868 3	0.880 5	0.841 6	1.405 1	3.074 9
IA-ⅡABC-G	I_{IA}	1.648 3	1.622 9	1.626 5	1.540 9	1.322 6
	I_{IIA}	0.844 6	0.859 9	0.859 6	1.811 5	1.775 9
	I_{IIB}	1.033 5	1.024 7	1.024 7	0.851 5	0.851 5
	I_{IIC}	0.917 1	0.902 2	0.881 7	1.624 6	3.859 9

表 2 接地短路故障电流相角的计算和仿真值对比

Table 2 Comparison between calculative and simulative results of grounding fault current phase angles

故障类型	故障电流	仿真值/(°)	计算值/(°)		误差/%	
			计及互感影响	未计及互感影响	计及互感影响	未计及互感影响
IA-ⅡA-G	I_{IA}	-173.531	-174.644 0	-174.717 0	0.641 4	0.683 5
	I_{IIA}	-115.189	-114.278 0	-137.523 0	0.790 8	19.389 0
IA-ⅡBC-G	I_{IA}	-171.307	-173.884 0	-171.412 0	1.504 3	0.061 2
	I_{IIB}	111.494	112.898 0	114.137 0	1.259 2	2.370 5
	I_{IIC}	-56.032	-57.039 9	-58.479 6	1.798 7	4.368 2
IA-ⅡABC-G	I_{IA}	-174.484	-173.626 0	-174.511 0	0.491 7	0.015 5
	I_{IIA}	-142.061	-140.477 0	-142.045 0	1.115 0	0.011 2
	I_{IIB}	92.914	92.094 0	92.914 0	0.882 5	0
	I_{IIC}	-33.109	-32.514 0	-34.128 0	1.797 1	3.077 7

表 3 不接地短路故障电流幅值的计算和仿真值对比

Table 3 Comparison between calculative and simulative results of phase-to-phase fault current amplitudes

故障类型	故障电流	仿真值/kA	计算值/kA		误差/%	
			计及互感影响	未计及互感影响	计及互感影响	未计及互感影响
IB-ⅡC	I_{IB}	0.609 7	0.600 6	0.575 5	1.492 5	1.492 5
	I_{IIC}	0.609 5	0.600 6	0.575 5	1.460 2	1.460 2
IA-ⅡBC	I_{IA}	0.702 7	0.712 1	0.648 3	1.337 6	7.741 6
	I_{IIB}	0.859 9	0.860 2	0.854 2	0.034 9	0.662 9
	I_{IIC}	1.038 7	1.034 7	1.016 2	0.385 1	2.166 2
IA-ⅡABC	I_{IA}	0.620 9	0.611 5	0.582 7	1.513 9	6.152 4
	I_{IIA}	0.785 7	0.788 3	0.796 8	0.330 9	1.412 8
	I_{IIB}	1.077 6	1.055 9	1.056 2	2.013 7	1.985 8
	I_{IIC}	1.149 8	1.141 7	1.135 2	0.704 4	1.269 8
IABC-ⅡABC	I_{IA}	2.100 8	2.086 8	2.086 8	0.666 4	0.666 4
	I_{IB}	2.101 9	2.086 8	2.086 8	0.723 5	0.723 5
	I_{IC}	2.100 5	2.086 8	2.086 8	0.652 2	0.652 2
	I_{IIA}	0.627 7	0.625 1	0.625 1	0.414 2	0.414 2
	I_{IIB}	0.627 6	0.625 1	0.625 1	0.398 3	0.398 3
	I_{IIC}	0.627 2	0.625 1	0.625 1	0.334 8	0.334 8

表4 不接地短路故障电流相角的计算和仿真值对比

Table 4 Comparison between calculative and simulative results of phase-to-phase fault current phase angles

故障类型	故障电流	仿真值/(°)	计算值/(°)		误差/%	
			计及互感影响	未计及互感影响	计及互感影响	未计及互感影响
IB- IIC	I_{IB}	86.189 3	84.515 4	84.265 6	1.942 1	2.231 9
	I_{IIC}	-93.826 4	-95.484 6	-95.734 4	1.767 3	2.033 5
IA- IIBC	I_{IA}	-164.609	-163.416	-164.017	0.724 7	0.359 6
	I_{IIB}	98.038	-97.568	99.889	0.479 4	1.888 1
	I_{IIC}	-39.819	-38.721	-40.741	2.757 4	2.315 5
IA- IABC	I_{IA}	-169.721	-173.888	-173.061	2.455 2	1.967 9
	I_{IIA}	-138.631	-138.358	-139.112	0.196 9	0.346 9
	I_{IIB}	82.650	81.814	82.345	1.011 4	0.369 2
	I_{IIC}	-22.439	-22.551	-23.618	0.499 1	5.254 2
IABC- IABC	I_{IA}	-177.761	-178.237	-178.237	0.267 7	0.267 7
	I_{IB}	61.212	61.766	61.766	0.905 1	0.905 1
	I_{IC}	-58.806	-58.236	-58.236	0.969 3	0.969 3
	I_{IIA}	-148.011	-148.496	-148.496	0.327 7	0.327 7
	I_{IIB}	91.942	91.499	91.499	0.481 8	0.481 8
	I_{IIC}	-28.027	-28.503	-28.503	1.698 4	1.698 4

3 结语

本文结合实际情况提出了针对中性点不同接地方式下混压部分同塔双回线路跨线故障的计算分析方法,该方法物理意义明确,通用性强,不仅适用于中性点不同接地方式下的混压部分同塔双回线路,同样适用于中性点相同接地方式下混压部分同塔及完全同塔双回线路,具有较强的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,1996:146-158.
- [2] 索南加乐,葛耀中,陶惠良. 利用六序分量复合序网法分析同杆双回线故障的方法[J]. 电力系统及其自动化学报,1991,3(1):92-106.
SUONAN Jiale, GE Yaozhong, TAO Huiliang. A new fault analysis method of the double circuit line on the same pole by use of the interconnection of six sequence networks[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1991, 3(1): 92-106.
- [3] 许侃,范春菊,许锦喜. 经过渡电阻短路接地故障的计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(7):44-51.
XU Kan, FAN Chunju, XU Jinxi. Study on calculation methods of ground fault through transition resistance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 44-51.
- [4] 许侃,范春菊. 不同电压等级部分耦合线路的单回线故障分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(12):81-87.
XU Kan, FAN Chunju. Line fault analysis on partial coupling lines at differential voltage levels[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 81-87.
- [5] 陆政君,范春菊,刘琦,等. 不同电压等级四回线的故障分析方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(13):3303-3313.
LU Zhengjun, FAN Chunju, LIU Qi, et al. Fault analysis method on four-parallel lines under different voltage levels[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3303-3313.
- [6] 陆政君,范春菊. 不同电压等级部分耦合输电线路故障测距[J]. 水电能源科学,2015,33(2):192-196.
LU Zhengjun, FAN Chunju. Fault location for partial coupling lines under different voltage levels[J]. Water Resources and Power,

2015, 33(2): 192-196.

- [7] 黄少锋,刘欣,王洪敏,等. 混压同塔四回线跨电压故障的短路计算[J]. 中国电机工程学报,2016,36(4):993-1001.
HUANG Shaofeng, LIU Xin, WANG Hongmin, et al. Cross-voltage short-circuit calculation on mixed-voltage four-circuit lines system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 993-1001.
- [8] 刘欣. 混压同塔输电线路跨电压故障计算及对保护影响分析[D]. 北京:华北电力大学,2016.
LIU Xin. Analysis on calculation of the cross-voltage short-circuit fault in mixed-voltage transmission lines system and influence on the relay protection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [9] 黄少锋,刘欣,张鹏,等. 混压同塔线路跨电压接地故障对距离保护的影响分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(1):96-101.
HUANG Shaofeng, LIU Xin, ZHANG Peng, et al. Influence on distance protection caused by earthed cross-voltage fault in multi-circuit transmission lines system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 96-101.
- [10] 田羽,范春菊,龚振东. 同杆四回线12序分量法[J]. 电力系统自动化,2007,31(21):35-39.
TIAN Yu, FAN Chunju, GONG Zhendong. Twelve-sequence component method of four-parallel lines on same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 35-39.
- [11] 夏溢,邵能灵,范春菊,等. 基于改进的12序分量法的参数不对称同塔四回线跨线故障计算方法[J]. 水电能源科学,2013,31(7):206-210.
XIA Yi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Calculation method for inter-line faults occurred in asymmetry-parameter four-parallel lines on same tower[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(7): 206-210.
- [12] 刘玲,范春菊. 基于六序分量法的跨电压等级的同塔四回线的故障计算[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(9):6-11.
LIU Ling, FAN Chunju. Fault calculation for joint four transmission lines of different voltage grades on the same tower based on six-sequence-component method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 6-11.
- [13] 张奋强,卢继平,梁沛. 基于疏松耦合变压器零序解耦模型的同杆双回线路故障计算[J]. 电力系统自动化,2016,40(4):98-104.

- ZHANG Fenqiang, LU Jiping, LIANG Pei. Fault calculation based on the zero sequence decoupling method of loose coupling transformer for double-circuit lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 98-104.
- [14] 张子衿, 丛伟, 肖静, 等. 含同杆双回的输电网零序反时限过流保护加速配合方案 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9): 159-165.
- ZHANG Zijin, CONG Wei, XIAO Jing, et al. Acceleration scheme of zero-sequence inverse-time overcurrent protection for double-circuit lines on same tower [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 159-165.
- [15] 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): 96-98.
- 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): 96-98.
- [16] 张艳霞, 王艳, 伍仕, 等. 基于六序分量法的六相输电系统故障选相 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 49-53.
- ZHANG Yanxia, WANG Yan, WU Shi, et al. Phase-selection for

six-phase power transmission system based on six-sequence components method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 49-53.

作者简介:



王 艳

王 艳(1981—),女,黑龙江富裕人,讲师,博士,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:18288061@qq.com);

刘美岑(1992—),女,辽宁海城人,硕士研究生,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:529468473@qq.com);

陈 旭(1994—),男,江西九江人,硕士研究生,研究方向为配电系统自动化(E-mail:995625805@qq.com);

刘俊德(1967—),男,辽宁海城人,高级工程师,从事电力系统运行与维护方面的工作;

焦彦军(1963—),男,河北安国人,教授,博士,研究方向为电力系统保护与控制。

Fault analysis of mixed-voltage double-circuit lines partly on same tower under different grounding modes of neutral point

WANG Yan¹, LIU Meicen¹, CHEN Xu¹, LIU Junde², JIAO Yanjun¹

(1. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Anshan Power Supply Company, Anshan 114001, China)

Abstract: Based on the sequential component method, the inter-line fault of mixed-voltage double-circuit lines partly on the same tower in neutral point directly grounding and indirectly grounding systems near substations is studied. Firstly, the zero-sequence mutual inductance between mixed-voltage double-circuit lines partly on same tower is eliminated, and the system is decoupled into comprehensive positive-, negative- and zero-sequence networks. According to wiring mode of three-winding transformers, the amplitude and phase angle of common impedance parts of the comprehensive positive-, negative- and zero-sequence networks are corrected, and the independent six-sequence network of mixed-voltage double-circuit lines partly on the same tower under different grounding modes of neutral points is obtained. The boundary condition of fault point is listed according to the fault types, and the short circuit current at fault point is obtained by the composite sequence network and its solution equations. Different types of faults in mixed-voltage(220 kV/110 kV/35 kV) double-circuit lines partly on same tower in neutral point directly grounded and indirectly grounded systems are simulated with PSCAD software, and the simulative results verify the accuracy and practicability of the proposed method.

Key words: neutral grounding modes; mixed-voltage double-circuit lines partly on the same tower; three-winding transformer; six-sequence network correction; inter-line fault