500 kV线路OPGW全绝缘对线路参数的影响研究

OPGW由常见的逐塔接地和分段绝缘、一点接地的方式改成全线绝缘后，会对线路运行参数带来的影响，主要体现在对线路继电保护和单相自动重合闸有影响的线路零序参数和潜供电流。基于对不同OPGW的运行方式的对比计算分析，提出了地线的接地方式改变后对线路零序参数和潜供电流的影响规律。

胡全[1] 戚力彦[2] 鲁俊[1] 刘炯[1]/1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司 2. 中国电力科学研究院

胡全/硕士研究生

关键词/Keywords
OPGW·
全绝缘·
零序参数·
潜供电流·

1 计算条件

1.1 交直流线路参数

所研究的线路参数如下。

1）线路形式。单回路、双回路。

2）线路长度。10 km、20 km、50 km、100 km、150 km、200 km；其中交流线路长度在100 km及以下的不换位，150 km和200 km的线路进行一次全循环换位。

3）地线型号。普通单回、双回线路采用一根普通地线和一根OPGW；单双回混合线路中两个单回路部分采用一回为一根普通地线和一根OPGW，另外一回为两根都是普通地线。普通地线型号：GJ－100、GJ－120、GJ－150钢绞线，LBGJ－100－20AC、LBGJ－120－20AC、LBGJ－150－40AC铝包钢绞线；OPGW光缆：OPGW－100、OPGW－120、OPGW－150；普通地线和OPGW配对按照等截面进行配对，普通地线考虑GJ和LBGJ两种情况。

4）输送容量。单回1 000 MW+j300 Mvar；双回2 000 MW+j600 Mvar.

1.2 OPGW全绝缘接线方式

OPGW采用全绝缘后，由于感应电压过高，需要调整接线方式以限制其感应电压，典型的接线方式为地线换位或导线换位两种。如图1、图2所示。

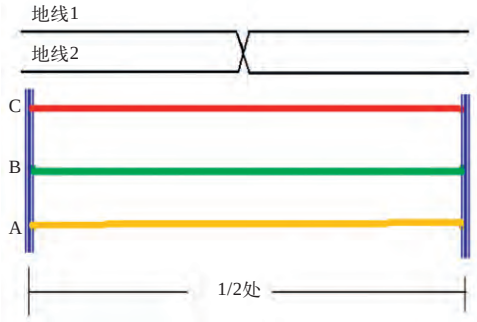

图1 线路导线不换位、地线换位示意图

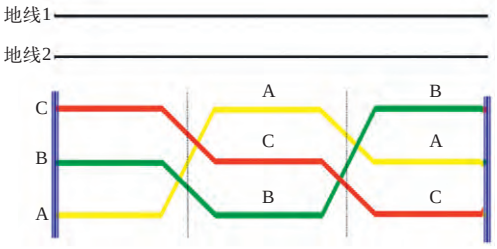

图2 导线换位、地线不换位示意图

2 OPGW全绝缘对交流线路零序参数的影响

OPGW地线的全绝缘后，在一定程度上会对交流线路的运行产生影响。本节重点对与零序参数进行计算分析。

2.1 线路零序参数

有双地线的单回路线路的零序阻抗由式（1）决定[1]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$Z_0' = Z_0 - Z_{0h}^2/Z_{0g} \quad (1)$$

$$Z_{0g} = 1.5R_g + 0.15 + j0.435\lg\frac{D}{\sqrt{r_e d_g}} \quad (2)$$

$$Z_{0h} = 0.15 + j0.435\lg\frac{D}{\sqrt[6]{d_{ag}d_{bg}d_{cg}d_{ah}d_{bh}d_{ch}}} \quad (3)$$

式中，Z_0为无地线时线路的零序阻抗，Ω/km；Z_{0h}为双地线与三相导线之间的互阻抗，Ω/km；Z_{0g}为双地线的零序阻抗，Ω/km；d_{gh}为双地线之间的距离，m；d_{ag}、d_{bg}、d_{cg}、d_{ah}、d_{bh}和d_{ch}为各导线与地线间的距离，m。

2.2 地线间隙不击穿时的零序参数

当线路故障时，若OPGW地线间隙不击穿，则OPGW地线仍然维持全线绝缘状态，在此主要对比目前常规的地线接地方式的零序阻抗进行对比计算分析。以单回线路为例，地线对线路零序阻抗的影响如下。

以长度为10 km、100 km和200 km的交流500 kV输电线路为例，地线不同的绝缘方式下，单回线路和同塔双回线路的零序阻抗。考虑地线的运行方式如下。

1）方式1。一根逐塔接地，另一根分段绝缘、一点接地。

2）方式2。两根地线均分段绝缘、一点接地。

3）方式3。两根地线均全线绝缘、无接地点。

其中方式1和方式2为常规的运行方式，方式3为OPGW全绝缘运行方式。

2.2.1不同地线型号的影响

相同地线型号不同系列（直径不同）对线路零序阻抗的影响如表1所示。

表1 相同地线型号不同系列（直径不同）对线路零序阻抗的影响（线路长度为10km）

线路	地线	线路零序阻抗/Ω		
单回线路	钢绞线	GJ-100	GJ-120	GJ-150
	OPGW光缆	OPGW-100	OPGW -120	OPGW -150
	方式3	1.69+j12.71	1.69+j12.71	1.69+j12.71
同塔双回线路	铝包钢绞线	LBGJ-100-20AC	LBGJ-120-20AC	LBGJ-150-20AC
	OPGW光缆	OPGW-100	OPGW -120	OPGW -150
	方式3	1.68+j12.70	1.68+j12.70	1.68+j12.70

由表1可知，对于导线融冰所采取的方式3，相同地线型号下直径不同对线路零序参数没有任何影响。在之后对地线的零序参数研究中，以钢绞线GJ－120、OPGW光缆OPGW－120和铝包钢绞线LBGJ－120－20AC为研究对象。

2.2.2 不同运行方式的影响

地线不同的绝缘方式下，单回线路和同塔双回线路的零序阻抗计算结果分别如表2、表3所示，计算采用EMTP软件。

表2 不同的地线绝缘方式下单回线路的零序阻抗

线路	线路长度/km	线路零序阻抗/Ω		
		方式1	方式2	方式3
单回线路	10	2.85+j10.95	1.69+j12.69	1.69+j12.71
	100	28.80+j110.0	16.72+j126.72	16.67+j127.20
	200	57.66+j222.34	33.49+j253.25	33.13+j255.10

表3 不同的地线绝缘方式下同塔双回线路的零序阻抗

线路	线路长度/km	线路零序阻抗/Ω		
		方式1	方式2	方式3
同塔双回线路	10	2.84+j10.94	1.68+j12.68	1.68+j12.70
	100	28.65+j10985	16.56+j126.57	16.52+j127.05
	200	57.36+j222.04	33.19+j252.95	32.83+j254.80

根据计算结果可得出以下结论。

1）方式3“地线全线绝缘”、与方式2“地线分段绝缘、一点接地”的线路零序参数接近，相差在1%以内。

2）方式3“地线全线绝缘”与方式1“一根地线逐塔接地、另一根分段绝缘、一点接地”时的线路零序阻抗差异较大，前者的零序电阻比后者小41%左右、零序电抗大15%左右。

2.3 地线绝缘间隙击穿对零序参数的影响

当导线发生接地故障时，地线间隙击穿对线路的零序参数有一定的影响[2-3]。以10 km和100 km的单回交流输电线路为例，地线接地方式3“两根地线全线一端接地，另一端悬空，沿线不进行分段和接地”，列出接地点附近地线绝缘子间隙1个、4个和全部间隙击穿时的线路零序阻抗以及与不击穿时结果的对比。如表4所示。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 4 地线绝缘间隙击穿后对线路零序阻抗的影响（单回路）

线路长度/km	阻抗差异/(%)	方式3			
		间隙不击穿	1个间隙击穿	4个间隙击穿	间隙全部击穿
10	计算值/Ω	1.69+j12.69	1.80+ j 12.65	2.00+ j 12.40	3.27+ j 9.75
	电阻差/%	0	6.5	18.3	93.5
	电抗差/%	0	0.3	2.3	30.2
100	计算值/Ω	16.68+j126.92	17.78+ j 126.54	19.86+ j 123.87	32.97+ j 93.99
	电阻差/%	0	6.6	19.1	97.7
	电抗差/%	0	0.3	2.4	35.0

由计算结果可以看出，当地线绝缘间隙击穿时，线路的零序参数电抗有所减小，而零序电阻逐渐变大，参数大小变化的程度随间隙击穿的数量增多而增大。在地线间隙全部击穿时，零序电阻增大了近一倍左右，零序电抗减小了30%~35%；零序阻抗的模值降低约20%，相角减小了约12°。

3 OPGW绝缘对潜供电流的影响

3.1 潜供电流

当输电线路发生单相接地故障时，故障相两侧断路器断开，健全相仍联接于电源继续运行。健全相线路的工作电压和电流通过相间互电容和互感对被切除的故障相产生静电感应和电磁感应，使故障相仍能维持一定的接地电流，该电流即为潜供电流[4]，如图3所示。

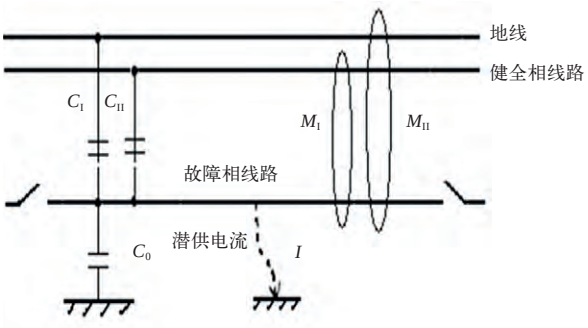

图3 地线对潜供电流的影响示意图

以单回线路为例，长度为l，其A相单相接地，该相线路两端断路器跳开，根据潜供电流的定义，其静电感应电流I_{j}、最大电磁感应电势E_{gm}及最大电磁感应电流I_{hm}数值可分别由式（4）~式（6）计算得到

$$I_j = j\omega l(C_B U_B + C_C U_C + C_1 U_1 + C_2 U_2) \tag{4}$$

$$E_{gm} = j\omega \frac{l}{2}(M_B I_B + M_C I_C + M_1 I_1 + M_2 I_2) \tag{5}$$

$$I_{hm} = \frac{2E_{gm}}{(j\omega Ll + 1/j\omega C_0 l)} = \frac{\omega l}{(\omega Ll - 1/\omega C_0 l)} \times (M_B I_B + M_C I_C + M_1 I_1 + M_2 I_2) \tag{6}$$

式中，C_1、$C2$为两地线对故障相的耦合电容；C_{B}、C_{C}为线路健全相对故障相的耦合电容；M_1、M_2为两地线对故障相的耦合电感；M_{B}、M_{C}为线路健全相对故障相的耦合电感。

同塔双回线路还要加上另一回路的感应。线路最大的潜供电流I_{m}是静电感应电流和电磁感应电流之和，即I_{m}=I_{j}+I_{hm}。

由于架空地线上有感应的电压和电流，通过对故障相的耦合电容、耦合电感影响潜供电流的大小。地线绝缘方式不同，其感应电压、电流值不同，因此，对潜供电流的影响亦不相同。但是，与输电线路的电压、电流相比，地线上的感应电压、电流数值很小（全线绝缘的无接地点的地线感应较大），总体上地线对潜供电流的影响不会太大。

3.2 OPGW不同接线方式潜供电流计算结果

以钢绞线GJ－120、OPGW光缆OPGW－120和铝包钢绞线LBGJ－120－20AC为研究对象，对上文相同的3种接线方式的潜供电流进行了计算，结果如表5所示。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图3　地线对潜供电流的影响示意图

线路	线路长度/km	10 I/A	100 I/A	200 I/A
单回线路	方式1	2.14	21.66	6.46
	方式2	2.14	21.69	6.88
	方式3	2.39	24.62	6.47
同塔双回线路	方式1	2.38	25.06	8.75
	方式2	2.38	25.09	9.02
	方式3	2.69	28.12	10.74

注：10 km、100 km线路无高抗补偿，200 km线路装设一台容量为180 Mvar的高抗。

根据计算结果可以看出：与不进行方式1和方式2相比，方式3的OPGW全线绝缘无接地点下线路的潜供电流和恢复电压比改造前大10%~20%，影响并不显著。

4　结束语

OPGW全线绝缘后，其接地方式由方式1“一根逐塔接地，另一根分段绝缘、一点接地”，或方式2“两根地线均分段绝缘、一点接地”改成方式3 “两根地线均全线绝缘、无接地点”。接地方式的改变对线路的运行造成一定的影响，主要体现在以下几个方面。

1）线路正常运行时（也是线路建成后线路参数测试的方式），方式3与方式2的线路零序参数接近，相差在1%以内；方式3与方式1的线路零序阻抗差异较大，前者的零序电阻比后者小41%左右、零序电抗大15%左右。

2）导线接地故障时，绝缘地线的间隙被击穿，线路的零序参数电抗有所减小，而零序电阻逐渐变大，参数大小变化的程度随间隙击穿的数量增多而增大。在地线间隙全部击穿时，零序电阻增大了近一倍左右，零序电抗减小了30%~35%；零序阻抗的模值降低约20%，相角减小了约12°。由于间隙击穿使线路的零序阻抗与线路参数测试结果呈现不同的值，在一定范围内可能影响到相关继电保护的定值。应适当地调整保护的灵敏度和可靠系数，以防系统发生故障时保护拒动或误动。

3）与不进行方式1和方式2相比，方式3的OPGW全线绝缘无接地点下线路的潜供电流和恢复电压比改造前大10%~20%，影响并不显著。

参考文献

[1] 东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册（第二版）[M]. 北京：中国电力出版社，2002：156-157.

[2] 吴伯华，陈继东，朱克. 架空地线间隙放电对线路零序阻抗的影响[J]. 高电压技术，2006，32（10）：8-10.

[3] 刘蕊，肖仕武，戴亚斌等. OPGW分段绝缘单点接地对线路保护的影响[J]. 现代电力，2012，29（3）：42-45.

[4] 陈禾，陈维贤，超特高压输电线路中潜供电流的电路分析和计算[J]. 高电压技术，2010，36(10).

（收稿日期：2015-05-15）EA

作者简介

胡全（1980-），男，硕士研究生，高级工程师，中国电机工程学会电磁干扰专业委员会输电线路电磁环境学组委员，主要研究方向为送电电气。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net