

云广±800 kV 特高压直流线路通信干扰计算

张继东¹, 李建华¹, 方万良¹, 李战鹰², 黄莹²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 南方电网技术研究中心, 510623, 广州)

摘要: 为了分析直流输电线路对通信干扰的影响,提出了一种准确计算直流输电线路对电信回路电磁干扰影响的方法.首次将交直流基波和谐波潮流统一算法应用于通信线路干扰计算中,在考虑了直流输电线路分布参数的情况下,进行了各种运行方式下直流输电线路的谐波电流和电压的计算,发现交流母线基波电压相位差对谐波电流计算有着不可忽略的影响.同时,利用线路的具体结构进行了通信干扰计算所需的各种参数的计算.在此基础上,根据不同运行方式分别计算了直流线路谐波电流正序、零序分量通过感性耦合引起的通信干扰,给出了云广直流线路在不同接近距离时通信回路上的等效干扰电压.提出的方法对正确地计算通信干扰有现实的意义.

关键词: 基波和谐波潮流统一算法;通信干扰;等效干扰电压;通信线路

中图分类号: TM721.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)04-0106-05

Calculation of Telecommunication Interference Caused by Yunnan-Guangdong ±800 kV Ultra High Voltage DC Transmission Link

ZHANG Jidong¹, LI Jianhua¹, FANG Wanliang¹, LI Zhanying², HUANG Ying²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China)

Abstract: To calculate the telecommunication interference caused by voltage high DC transmission lines, an accurate method is proposed, where the unified fundamental frequency and harmonic load flow algorithm is firstly applied to the telecommunication interference. The distributions of harmonic voltage and harmonic current along DC lines under different operation modes are calculated with an accurate model of converter and the distribution parameters of DC lines, and the influence of the fundamental frequency voltage phase-difference of AC buses at the two terminals is considered. The different parameters and coefficients necessary for telecommunication interference calculation, such as the screening factor of overhead ground wire and coupling impedances, are calculated for Yunnan-Guangdong ±800 kV ultra high voltage DC (UHVDC) transmission lines. The telecommunication interferences caused by positive-sequence and zero-sequence components of harmonic current under different operation modes are estimated respectively. The equivalent interference voltage caused by Yunnan-Guangdong UHVDC transmission lines with different adjacent distances is obtained.

Keywords: unified fundamental frequency and harmonic load flow algorithm; telecommunication interference; equivalent interference voltage; telecommunication line

直流输电线路在正常运行情况下存在音频范围内的谐波电压和谐波电流,这些谐波电压和电流通

过耦合对邻近电信回路产生干扰,降低通话质量^[1]. 由于直流输电线路对通信回路的干扰所涉及因素相

当多,目前国内外还没有正式的规程或标准,而且在计算方法及考虑因素上存在很大的不同.目前研究普遍认为干扰影响主要来自大地回路的电流(零序电流),极导线的谐波电流(正序电流)产生的干扰影响很小,可以不考虑.文献[2]中提到如果平衡模式电流(本文的正序电流)不大于剩余模式电流(本文的零序电流)的50倍,则通信线路上的噪声主要由直流线路谐波电流的剩余模式分量所引起,但没有给出理论根据.文献[3]在计算双极回路的干扰影响时,分别计算了正序和零序谐波电流沿线分布,并计算了干扰影响,但没有给出各参数的处理方法.文献[4]基于三脉动模型进行了谐波计算,但文中给出的谐波电流沿线分布完全不符合直流线路的长线特征.文献[5]对等效干扰电流没有区分它对应于谐波电流的正序分量或零序分量.同时,以上文献中均没有明确架空地线屏蔽系数的作用范围,在计算中采用的屏蔽系数、互感系数均为近似数据,显然这些系数均与线路的具体结构有关.

本文首先采用交直流侧基波和谐波潮流统一算法,计算出云广±800 kV 特高压直流线路的各次特征和非特征谐波电压、电流,并得到其沿线的分布规律.针对云广±800 kV 特高压直流线路的具体结构,计算了架空地线屏蔽系数和耦合阻抗.在此基础上,根据不同运行方式,分别计算直流线路谐波电流正序、零序分量通过感性耦合引起的通信干扰,得到了等效干扰电压,并对计算结果进行了分析.

1 直流线路谐波电压、电流计算

1.1 计算方法^[6]

在通信干扰计算中必须知道直流线路沿线的各次谐波电流的分布.在常规的计算中将换流器直流侧视为谐波电压源,计算直流系统的谐波.由于没有考虑交、直流系统的相互影响,其计算结果存在较大误差^[7].本文采用了交、直流侧基波和谐波潮流统一算法,该算法在建立换流器数学模型时就考虑到其交流侧存在谐波电压及在其直流侧存在谐波电流,得出了一个比较准确的换流器数学模型,然后将它与交、直流网络的数学模型一起联立求解.该方法全面地考虑了交、直流系统之间,基波和谐波潮流之间的相互作用,能够得到比较准确的交流系统和直流系统各次谐波电流和电压的分布.

1.2 计算条件

云广±800 kV 特高压直流输电系统在双极对称运行方式下的等效网络如图1所示,直流线路长

为1 438 km,整流站和逆变站的每极由两组12脉冲的换流装置串联组成.

特征谐波和非特征谐波计算条件如下:①双极对称运行输送容量为5 000 MW,整流侧直流电压为800 kV,直流电流为3 125 A;②整流器滞后触发角为 $(15 \pm 1)^\circ$,逆变侧熄弧角为 $(18 \pm 1)^\circ$;③交流母线电压含有1%的基波负序分量;④换流变压器三相参数偏差为 $\pm 5\%$;⑤换流器触发脉冲间隔偏差为 $\pm 0.25^\circ$.

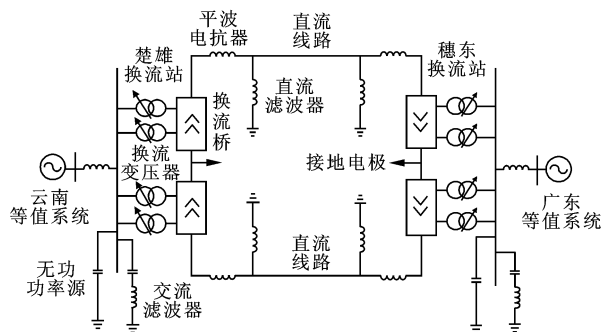


图1 ±800 kV 直流输电系统谐波计算用等效电路图

1.3 交流母线基波电压相位差的影响

由于云广±800 kV 特高压直流输电系统采用12脉冲换流器,两端交流母线基波电压相位差对直流系统的影响将每隔 30° 重复一次.在双极对称额定运行且只考虑特征谐波的情况下,沿直流线路12次谐波电压、电流的最大值与两端交流母线基波电压相位差之间的关系如图2所示.由图可以看出,电压相位差对谐波电压、电流的影响很大,其最大值比相位差为 0° 时的数值约大一倍,比其最小值甚至大5倍左右,对应于12次谐波电流最大的交流基波电压相位差为 8° (整流侧超前).

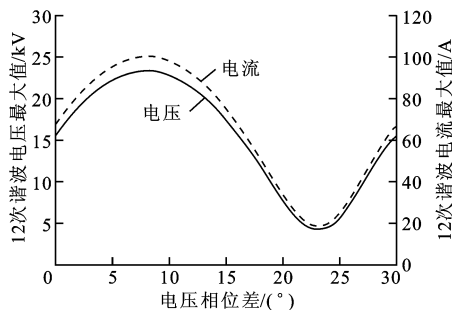


图2 12次谐波电流、电压最大值与电压相位差的关系

由图3还可以看出,直流线路在谐波频率下更显现长线的特征.对于12次谐波,其波长相当于基波的 $1/12$,即约为 $6\ 000/12=500$ km(实际466.05 km),而1 438 km的云广线路对于12次谐波来说

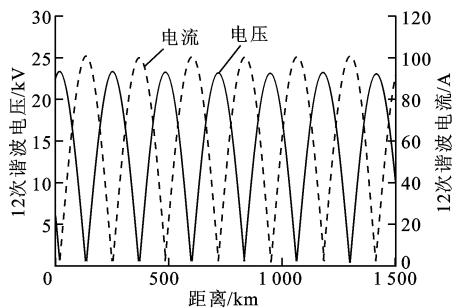


图3 双极对称额定运行沿线 12 次谐波电压、电流分布

约相当于 3.09 个波长,这与图 3 中的曲线形状吻合.正是由于这一长线特征,使沿线的 12 次谐波电流的大小相差十分悬殊,最大约 100 A,而最小只 1.56 A.如果通信线路处于谐波电流最大的位置,则将受到比较大的干扰,而若位于电流最小处则所受干扰很小.

由图 3 还可看出,沿线的电压与电流分布形状相同,但谐波电流最大处的谐波电压几乎最小,而谐波电流最小处的谐波电压几乎最大,这也属于长线的特征.它说明沿着直流输电线路,可能有些地方的通信回路受电磁耦合的干扰影响较大,而另一些地方受静电感应的干扰影响较大.

在单极金属回路运行情况下,当整流侧交流母线基波电压相位超前于逆变侧 22° 时对谐波电压和电流的影响最大.沿直流线路 12 次谐波电流、电压分布与双极运行情况有相似规律,但与双极对称运行相比 12 次谐波电流、电压都比较大,原因是云广直流线路在单极金属运行情况下(无滤波器时),12 次谐波下直流系统的平波电抗器参数($j1\ 432.57$)与直流线的 Π 等值电路并联支路中的电抗值($-j1\ 680.06$)接近,出现了类似于串联谐振的现象.

在单极大地回路运行情况下,当整流侧交流母线基波电压相位超前于逆变侧 9° 时对谐波电压和电流的影响最大.此时沿直流线路 12 次谐波电流、电压的分布情况如图 4 所示.

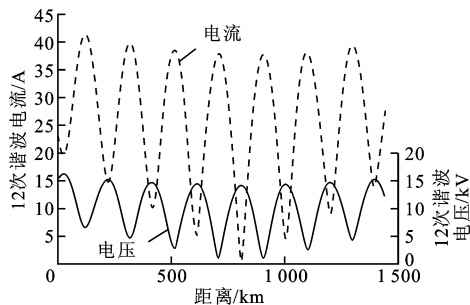


图4 单极大地回路额定运行沿线 12 次谐波电流、电压分布

线路零序分量波长为 392.06 km,对于 12 次谐波来说约相当于 3.67 个波长,这与图 4 中的曲线形状也是吻合的.

2 直流线路屏蔽系数和互阻抗计算

2.1 直流架空地线屏蔽系数

当两极导线电流不平衡时,在架空地线的导线-大地回路中将流过电流,其结果将削弱导线-大地回路对邻近通信回路的影响,该现象用零序电流屏蔽系数 K_{Gf} 来反映.

由图 5 可见,零序电流的屏蔽系数小于 1,当 800 Hz 时在 0.5 附近.显然,在计算通信干扰影响时应该计及架空地线的影响,不然将可能使干扰的严重程度不适当地扩大一倍.

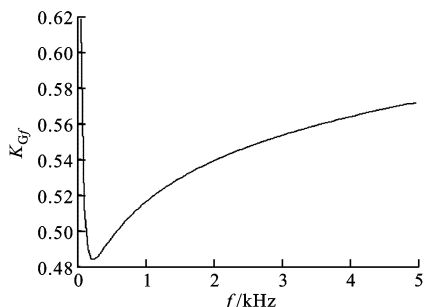


图5 架空地线对零序电流的屏蔽系数

2.2 直流线路与通信回路之间的耦合阻抗

在电磁干扰的研究中,需要计算通信线路和直流线路之间的互阻抗,其与线路布置、频率和大地电阻率及环境条件等因素有关,要精确计算这一互阻抗的值是非常困难的,本文采用文献[8]附录 A 中的公式进行计算,计算结果与采用 Carson 无穷级数公式的计算结果差别在 1% 以内.

由于直流线路谐波电流正序和零序分量对通信干扰的影响不同,需分别计算它们与通信回路之间的耦合阻抗.对于零序阻抗,取两极导线中心与通信线之间的水平距离作为接近距离,零序阻抗(Z_{f0})随接近等效距离变化的计算值如图 6 所示.对于正序阻抗(Z_{f+}),则分别取两极导线与通信线之间的水平距离作为接近距离,代入阻抗计算公式,然后将两者的实部和虚部分别相减得到^[2],正序阻抗随接近等效距离变化的计算值如图 7 所示.

在实际工程中,通信线路与直流输电线路还包括斜接近段和交叉跨越段,相对不同的接近情况有不同的计算公式,本文不再详述.

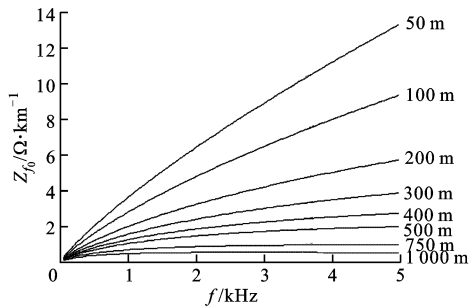


图 6 零序互阻抗的计算结果(大地电阻率为 1 500 Ω/m)

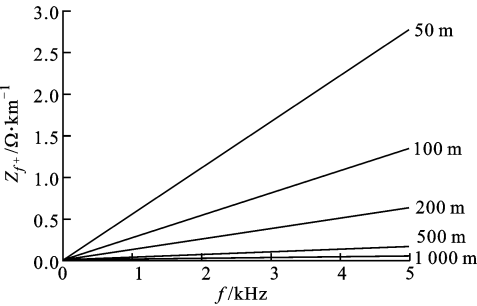


图 7 正序互阻抗的计算结果(大地电阻率为 1 500 Ω/m)

3 直流线路等效干扰电流、电压计算

在分析电磁耦合所引起的干扰影响时,常采用国际电报电话咨询委员会(CCITT)所提出的等效干扰电流和电压的方法.文献[9]中的等效干扰电流的定义为:在送电线路中流过 800 Hz 的电流,使在邻近电话回路中所引起的噪声计电动势与线路内实际存在各次谐波电流所引起的噪声计电动势相等,该 800 Hz 电流即为等效干扰电流

I_{eq} = \frac{1}{p_{800}} (\sum (h_f p_f I_f)^2)^{1/2} \tag{1}

式中: p_f 为频率 f 下的 CCITT 制杂音权重系数; h_f 为送电线路与通信回路间的耦合系数, $h_f = K_{Bf} K_{Sf}$, K_{Bf} 为通信回路平衡系数, K_{Sf} 为通信线路屏蔽系数; I_f 为引起干扰的电流在频率 f 下的分量.

在进行等效干扰电压计算时,不同的运行方式不但谐波电压和电流的大小不同,而且它们与通信回路之间的耦合性质也不相同,必须分别加以考虑.

在双极对称运行情况下,对于特征谐波来说,直流线路中仅流过正序分量的特征谐波电流,它们通过直流线路与通信回路之间的正序耦合阻抗在通信回路中产生干扰电压,而直流线路上的架空地线对此并不产生屏蔽作用,等效干扰电流为

I_{eq+} = \frac{1}{p_{800}} (\sum (h_f p_f I_{f+})^2)^{1/2} \tag{2}

等效干扰电压(表示为 V_{eq+})为

V_{eq+} = \frac{1}{p_{800}} (\sum (p_f K_{Bf} K_{Sf} Z_{f+} I_{f+})^2)^{1/2} \tag{3}

式中: Z_{f+} 为直流线路与通信线路间的正序互阻抗.当考虑非特征谐波影响时,流过直流线路的谐波电流可以分解成正序分量 I_{f+} 和零序分量 I_{f0} ,并分别计算出相应的等效干扰电压 V_{eq+} 和 V_{eq0} ,以及等效干扰电流 I_{eq+} 和 I_{eq0} .其中, V_{eq+} 和 I_{eq+} 仍按式(2)和式(3)进行计算,而

V_{eq0} = \frac{1}{p_{800}} (\sum (p_f K_{Bf} K_{Sf} Z_{f0} K_{Gf} I_{f0})^2)^{1/2} \tag{4}

I_{eq0} = \frac{1}{p_{800}} (\sum (h_f p_f I_{f0})^2)^{1/2} \tag{5}

求得正序和零序等效干扰电压及电流后,将它们分别相加,便可得出总等效干扰电压 V_{eq} 和总等效干扰电流 I_{eq} ,即

V_{eq} = V_{eq+} + V_{eq0} \tag{6}

I_{eq} = I_{eq+} + I_{eq0} \tag{7}

在具体计算中,暂时取 $K_{Bf} = 0.001$,并考虑到一些通信线路本身无磁屏蔽,故取 $K_{Sf} = 1$.

在云广±800 kV 直流输电系统双极对称额定运行情况下,对两端交流母线基波电压相位差分别取 0°和 8°,通信回路接近距离分别取 100、200、500、1 000 m,并对只含特征谐波和考虑特征谐波和非特征谐波两种情况进行了计算.结果表明,非特征谐波在各种运行方式下影响都很小,仅把考虑特征谐波时的最大值整理在表 1、表 2 中.

表 1 双极对称额定运行情况下的结果(相位差 0°)

接近距离/m	100	200	500	1 000
等效干扰电压/ $10^{-3} \times V \cdot km^{-1}$	9.17	4.40	1.62	0.63
等效干扰电流/mA	41.63	41.72	42.39	44.48

表 2 双极对称额定运行情况下的结果(相位差 8°)

接近距离/m	100	200	500	1 000
等效干扰电压/ $10^{-3} \times V \cdot km^{-1}$	14.02	6.83	2.43	0.93
等效干扰电流/mA	63.65	63.53	63.68	66.03

表 1 和表 2 说明,考虑两端交流母线基波电压的相位差的不同,计算结果差别是很大的.从表 2 的结果可以看出,在双极对称运行时,接近距离为 200 m 时,等效干扰电压超过限制值,该情况是不能忽略的.

单极金属回路运行时,无论是特征谐波还是非特征谐波,在直流线路上的电压和电流中只存在正序分量.对两端交流母线基波电压相位差分别取 0°和 22°,通信回路的接近距离分别取 100、200、500、1 000 m,

将特征谐波的结果整理在表3、表4中.单极金属回路中流过正序电流,可见这种运行情况下的等效干扰电压也是不能忽略的.

表3 单极金属额定运行情况下的结果(相位差 0°)

接近距离/m	100	200	500	1 000
等效干扰电压/ $10^{-3}\times\text{V}\cdot\text{km}^{-1}$	37.40	18.34	6.67	2.60
等效干扰电流/mA	169.8	170.6	174.8	185.05

表4 单极金属额定运行情况下的结果(相位差 22°)

接近距离/m	100	200	500	1 000
等效干扰电压/ $10^{-3}\times\text{V}\cdot\text{km}^{-1}$	50.94	24.96	9.06	3.53
等效干扰电流/mA	231.2	232.2	237.5	251.1

单极大地回路运行时,无论是特征谐波还是非特征谐波,只有一极导线流过电流,只存在零序分量的情况.对两端交流母线基波电压相位差分别取 0°和 9°,通信回路的接近距离分别取 100、200、500、1 000 m,将特征谐波的结果整理在表5、表6中.

表5 单极大地额定运行情况下的结果(相位差 0°)

接近距离/m	100	200	500	1 000
等效干扰电压/ $10^{-3}\times\text{V}\cdot\text{km}^{-1}$	22.51	16.56	9.28	4.71
等效干扰电流/mA	9.59	9.74	10.12	10.75

表6 单极大地额定运行情况下的结果(相位差 9°)

接近距离/m	100	200	500	1 000
等效干扰电压/ $10^{-3}\times\text{V}\cdot\text{km}^{-1}$	30.94	22.79	12.80	6.50
等效干扰电流/mA	13.18	13.40	13.95	14.84

从上述表中可以看出,双极对称、单极金属回路和单极大地回路3种运行情况下,各次特征谐波电压的大小彼此不超过一倍,双极对称和单极金属回路运行情况下的等效干扰电流(只含正序分量)只比单极大地回路运行情况下的等效干扰电流(只含零序分量)大5~18倍(远小于50倍),而在单极金属回路运行情况下的等效干扰电压却大于单极大地回路运行情况,特别是接近距离较小时更为显著.因此,许多文献认为通信线路上的干扰影响主要由直流线路谐波电流的零序分量所引起,都是没有理论依据的.

计算某一具体通信回路上所受到的等效干扰电压可以采用以下方法.首先根据具体运行方式和接近距离,应用表2、表4、表6中的数据通过插值方法求出等效干扰电压的最大值 V_{eqmax} ,再将它依次乘以通

信回路在 800 Hz 下对电磁耦合的屏蔽系数 K_{S800} 、实际平衡系数 K_{B800} 与 0.001 的比值,以及通信回路实际长度 l ,即

$$V_{eq} = V_{eqmax} K_{S800} \frac{K_{B800}}{0.001} l \quad (\text{mV}) \quad (8)$$

这样得出的等效干扰电压是认为通信回路正好处于直流线路等效干扰电压最大的位置.如果要考虑到通信回路的实际位置,则可以应用表2、表4、表6通过插值同时得出等效干扰电压最小值,然后用正弦曲线对等效干扰电压的沿线分布曲线进行拟合,从而求出通信回路所在位置的等效干扰电压.

4 结 论

(1)交流系统基波相位差对通信干扰有很大影响,应根据实际系统和运行方式确定两端相位差以取得最大的干扰影响.

(2)由于等效干扰电流分布的长线特征,使等效干扰电压最大值与最小值之间相差悬殊,在计算具体通信回路受到的干扰时,要考虑其所在的位置.

(3)用等效干扰电流来衡量电磁干扰的严重程度是不能得出正确结果的,应该根据直流线路和通信回路的具体结构、相对位置和有关参数,分别计算正、零序分量的等效干扰电流、电压,再计算出通信回路相应的等效干扰电压,用它来决定是否满足干扰要求.

(4)对云广±800 kV 线路来说,虽然单极大地回路运行情况下的等效干扰电流比双极对称运行情况小得多,但等效干扰电压却比双极对称运行情况大,而单极金属回路运行情况下的等效干扰电压则大于单极大地回路运行情况下的等效干扰电压.

(5)由于直流侧的谐波电压、电流中12次谐波分量较其他谐波分量大得多,所以非特征谐波的出现对特征谐波的影响很小,在工程中完全可以只用特征谐波求计算通信干扰.

参考文献:

[1] 庞廷智. 直流输电线路对电信线路影响的标准及计算[J]. 电网技术,1999,23(11):50-54.
PANG Tingzhi. Standard and calculation of effects of DC transmission lines on the telecommunication lines [J]. Power System Technology, 1999, 23(11): 50-54.

[2] IEEE Power Engineering Society. IEEE guide for analysis and definition of DC side harmonic performance of HVDC transmission systems, IEEE Std 1124-2003 [S]. New York, USA: IEEE Power Engineering Society, 2003.

[3] 陆家榆,鞠勇,庞廷智. ±800 kV 直流输电线路对电信

线路的危险和干扰影响研究[J]. 中国电力, 2007, 40(4): 20-24.

LU Jiayu, JU Yong, PANG Tingzhi. Study on danger and interference effects of ±800 kV DC transmission lines on telecommunication lines [J]. Electric Power, 2007, 40 (4): 20-24.

[4] 周长春,徐政,郑劲. 三峡-广东直流线路电信干扰计算 [J]. 电网技术, 2003, 27(1): 13-17.

ZHOU Changchun, XU Zheng, ZHENG Jin. Calculation of telecommunication interferences caused by Three Gorges-Guangdong HVDC link[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 13-17.

[5] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[6] 夏道止,沈赞坝. 高压直流输电系统的谐波分析及滤波 [M]. 北京:水利电力出版社, 1994.

[7] 李战鹰, 李建华, 夏道止. ±800 kV 特高压直流输电系统特征谐波分析[J]. 电网技术, 2006, 30 (24): 6-9.

LI Zhanying, LI Jianhua, XIA Daozhi. Analysis of characteristic harmonics in ±800 kV ultra high voltage direct current power transmission system [J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 6-9.

[8] 西南电力设计院. DL/T5033—2006 输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计规程[S]. 北京:中国电力出版社, 2007.

[9] International Telegram and Telephone Consultative Committee (CCITT). Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electricity lines [M]. Geneva, Switzerland:CCITT, 1989.

(编辑 杜秀杰)