

交流 1 000 kV 特高压线路三相故障暂态过程分析

柴济民¹, 吴通华², 郑玉平²

(1. 常州工学院 电子信息与电气工程学院, 江苏 常州 213002;

2. 国网电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 通过理论分析和仿真验证得到特高压线路三相故障后相关暂态电气量的特点: 特高压线路故障电流中除有一很大的衰减直流分量外还存在高频分量; 故障电压中也含有较大的高频分量但没有直流分量; 故障高频分量的初始值与短路角(以电压角为基准)有关, 当故障角为 90° 时, 高频分量的初始值最大; 高频谐波的频率与故障距离和系统运行方式有关, 系统方式越小, 故障距离越大, 高频谐波频率越接近于工频; 故障距离越远, 电流、电压中的谐波含量对基波分量的影响越大; 相同的故障条件下, 故障电压中的高次谐波要比故障电流更加严重; 并联电抗器可以降低线路的稳态电容电流, 但对故障暂态电容电流的作用不明显。

关键词: 特高压线路; 非周期分量; 高频分量; 继电保护

中图分类号: TM 711; TM 723

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)03-0103-06

0 引言

特高压输电线路是我国未来电网的骨架, 与超高压输电线路相比, 特高压输电线路输电距离大, 单位长度分布电容以及电抗与电阻的比值更大^[1-6], 故障后特高压线路呈现出更加明显的暂态过程, 暂态电气量中的非工频分量更加严重, 这对目前广泛应用的基于工频量的继电保护原理可能造成较大影响^[4]。本文利用一种实用方法分析了暂态故障电气量中的非周期分量和高频谐波的特点及影响因素, 同时通过仿真计算验证了相关的结论, 为特高压线路继电保护装置的开发提供相关的基础和依据。本文的分析基于一次系统, 不涉及电压、电流互感器可能的暂态过程。

1 特高压对称故障暂态过程分析

在以往的文献资料分析中^[7], 由分布参数分析线路故障暂态过程而得到的非周期分量和高次谐波具有较为精确的理论基础, 但过程和结果都较为复杂, 难以得出相对直观的结论; 基于单个“T”或“π”模型虽能得到一些有效结论, 但在故障距离较大时的分析结果, 尤其是高次谐波的分析结果, 不是很准确。目前对特高压线路暂态过程中的非周期分量和高次谐波缺乏相对定量的分析结果。

文献^[7]用拉普拉斯算法对一些线路的暂态过程进行了具体计算, 通过计算得到了一些有用结论, 采用多个“T”或者“π”模型来等效线路相对准确。本文采用 2 个“T”模型来等效故障线路, 把故障后的网络应用叠加定理分为正常运行网络和故障附加网络。如

图 1 和图 2 所示, 基于故障附加网络对故障暂态过程用拉普拉斯法进行分析。故障附加网络拉普拉斯图如图 3 所示。

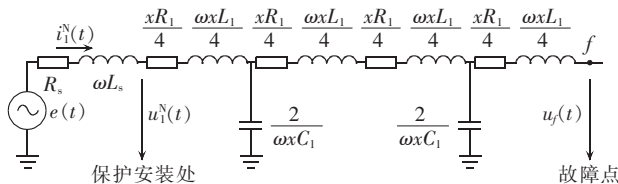


图 1 正常运行电路图

Fig.1 Circuit in normal state

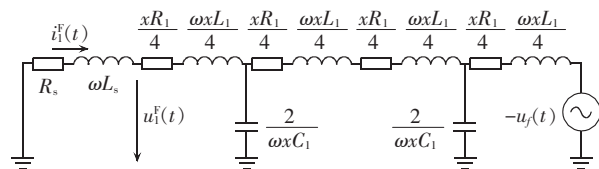


图 2 故障附加状态

Fig.2 Circuit in fault status

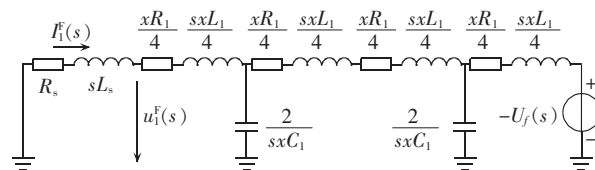


图 3 故障附加网络拉普拉斯图

Fig.3 Laplace circuit of grid in fault status

图中, $i_1^N(t)$ 、 $u_1^N(t)$ 和 $i_1^F(t)$ 、 $u_1^F(t)$ 分别为正常运行和故障附加状态时保护安装处的电流、电压; R_s 、 L_s 分别为电源等效电阻和电感; x 为故障距离; $u_f(t)$ 为故障点 f 处电压。若线路故障前空载, 则假设故障点正常电压为

$$u_f(t) = e(t) = E_m \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

为简化分析, 将电源电压的幅值简化为 1, 即令

$E_m=1$, 则有

$$u_f(t) = \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

$$U_f(s) = (s \sin \theta + \omega \cos \theta) / (s^2 + \omega^2) \quad (3)$$

为便于分析, 假设有 $R = xR_1/4$, $L = xL_1/4$, $C = xC_1/2$, $R_m = R_s + R$, $L_m = L_s + L$, 则图 3 可以简化为图 4。

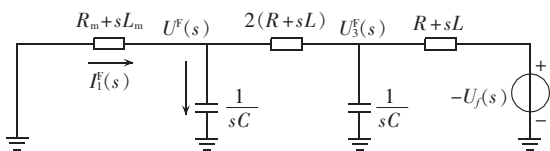


图 4 拉普拉斯等效电路

Fig.4 Equivalent Laplace circuit

由图 4, 应用节点电压法有

$$\left[\frac{1}{R_m + sL_m} + sC + \frac{1}{2(R + sL)} \right] U^F(s) - \frac{1}{2(R + sL)} U_3^F(s) = 0 \quad (4)$$

$$\left[\frac{1}{2(R + sL)} + sC + \frac{1}{R + sL} \right] U_3^F(s) - \frac{1}{2(R + sL)} U^F(s) = -\frac{U_f(s)}{R + sL} \quad (5)$$

结合图 3 和图 4, 电压 $U_1^F(s)$ 为

$$U_1^F(s) = U^F(s) (R_s + sL_s) / (R_m + sL_m) \quad (6)$$

应用式 (4)~(6) 得到故障电压和故障电流分别为

$$U_1^F(s) = -U_f(s) (R_s + sL_s) / Z(s) = -\frac{s \sin \theta + \omega \cos \theta}{s^2 + \omega^2} \frac{R_s + sL_s}{Z(s)} \quad (7)$$

$$Z(s) = A_0 + sA_1 + s^2A_2 + s^3A_3 + s^4A_4 + s^5A_5$$

$$A_0 = R_m + 3R$$

$$A_1 = L_m + 4CRR_m + 2CR^2 + 3L$$

$$A_2 = 4C(R_mL + RL_m + RL) + 2R^2R_mC^2$$

$$A_3 = 4LL_mC + 2L^2C + 4RR_mC^2L + 2R^2C^2L_m$$

$$A_4 = 2LC^2(LR_m + 2RL_m)$$

$$A_5 = 2L^2L_mC^2$$

根据式 (7), 由 2 个“T”模型可以分析出 2 个高频谐波分量, $Z(s)=0$ 可以求出 1 个实根和 2 对共轭复根: 实根对应非周期分量的衰减常数; 共轭复根对应 2 个高频谐波分量, 其实部对应高频分量的衰减常数, 其虚部则对应高频分量的频率大小。

由于特高压线路的电阻相比电抗和容抗小得多, 分析初始值时可视为无损线^[7], 即认为 $R_s = R = R_m = 0$, 从而 $A_0 = A_2 = A_4 = 0$, 电压可以简化为

$$U_1^F(s) = -\frac{s \sin \theta + \omega \cos \theta}{s^2 + \omega^2} \frac{L_s}{A_1 + s^2A_3 + s^4A_5} \quad (8)$$

由 $A_1 + s^2A_3 + s^4A_5 = 0$ 可以求出 2 对零实部的共轭复根, 虚部对应 2 个高频谐波的角频率 ω_2 和 ω_3 :

$$\omega_2 = [(A_3 - \sqrt{A_3^2 - 4A_1A_5}) / (2A_5)]^{1/2} \quad (9)$$

$$\omega_3 = [(A_3 + \sqrt{A_3^2 - 4A_1A_5}) / (2A_5)]^{1/2} \quad (10)$$

从式 (9) (10) 可以看到, ω_3 明显大于 ω_2 , 代入各系数表达式, 可以得到距离工频最近的高频谐波角频率为

$$\omega_2 = \left[\frac{8L_s + 3xL_1 - \sqrt{16L_s^2 + (xL_1 + 4L_s)^2}}{x^2L_1C_1(xL_1/4 + L_s)} \right]^{1/2} \quad (11)$$

对于高频分量的初始值, 将图 4 中的电阻衰减忽略来进行计算, 因此:

$$U_1^F(s) = -\frac{s \sin \theta + \omega \cos \theta}{s^2 + \omega^2} \frac{L_s/A_5}{(s^2 + \omega_2^2)(s^2 + \omega_3^2)} \quad (12)$$

将式 (12) 进行化简, 可以得到:

$$U_1^F(s) = -\frac{L_s(s \sin \theta + \omega \cos \theta)}{A_5(\omega_3^2 - \omega_2^2)} \times \left[\frac{1}{\omega_2^2 - \omega^2} \left(\frac{1}{s^2 + \omega^2} - \frac{1}{s^2 + \omega_2^2} \right) \right] + \frac{L_s(s \sin \theta + \omega \cos \theta)}{A_5(\omega_3^2 - \omega_2^2)} \times \left[\frac{1}{\omega_3^2 - \omega^2} \left(\frac{1}{s^2 + \omega^2} - \frac{1}{s^2 + \omega_3^2} \right) \right] = K_1(s \sin \theta + \omega \cos \theta) \times \left(\frac{K_{\omega_2} - K_{\omega_3}}{s^2 + \omega^2} - \frac{K_{\omega_2}}{s^2 + \omega_2^2} + \frac{K_{\omega_3}}{s^2 + \omega_3^2} \right) \quad (13)$$

$$K_1 = -L_s / [A_5(\omega_3^2 - \omega_2^2)]$$

$$K_{\omega_2} = 1 / (\omega_2^2 - \omega^2)$$

$$K_{\omega_3} = 1 / (\omega_3^2 - \omega^2)$$

保护处电流则为

$$I_1^F(s) = -\frac{U_1^F(s)}{sL_s} = K_2 \left(\sin \theta + \frac{\omega \cos \theta}{s} \right) \times \left(\frac{K_{\omega_2} - K_{\omega_3}}{s^2 + \omega^2} - \frac{K_{\omega_2}}{s^2 + \omega_2^2} + \frac{K_{\omega_3}}{s^2 + \omega_3^2} \right) \quad (14)$$

$$K_2 = 1 / [A_5(\omega_3^2 - \omega_2^2)]$$

对式 (13) (14) 求解, 可以得到:

$$u_1^F(t) = K_1(K_{\omega_2} - K_{\omega_3}) \sin(\theta + \omega t) - K_1K_{\omega_2} \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2} \right) \sin^2 \theta + \frac{\omega^2}{\omega_2^2} \right]^{1/2} \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + K_1K_{\omega_3} \left(\sin^2 \theta + \cos^2 \theta \frac{\omega^2}{\omega_3^2} \right)^{1/2} \sin(\omega_3 t + \varphi_3) \quad (15)$$

$$\varphi_2 = \arctan \frac{\omega}{\omega_2 \tan \theta}, \quad \varphi_3 = \arctan \frac{\omega}{\omega_3 \tan \theta}$$

$u_1^F(t)$ 中三部分分别对应于故障附加网络中的基波电压、频率为 ω_2 的高次谐波、频率为 ω_3 的高次谐波。应用叠加定理, 故障电压中的基波分量为正常电压加上故障附加网络中的基波电压, 计算式为

$$u_\omega(t) = [1 + K_1(K_{\omega_2} - K_{\omega_3})] \sin(\theta + \omega t) \quad (16)$$

值得注意的是, $K_1 < 0$, 表示保护处工频电压在故障后是下降的。

$$i_1^F(t) = -K_2(K_{\omega_2} - K_{\omega_3}) \frac{\cos(\omega t + \theta)}{\omega} + \frac{K_2 \cos \theta}{\omega} \left[\left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_2^2} \right) K_{\omega_2} - \left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_3^2} \right) K_{\omega_3} \right] + \frac{K_2 K_{\omega_2}}{\omega_2} \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2} \right) \sin^2 \theta + \frac{\omega^2}{\omega_2^2} \right]^{1/2} \cos(\omega_2 t + \psi_2) - \frac{K_2 K_{\omega_3}}{\omega_3} \left(\sin^2 \theta + \cos^2 \theta \frac{\omega^2}{\omega_3^2} \right)^{1/2} \cos(\omega_3 t + \psi_3) \quad (17)$$

$$\psi_2 = \arctan \frac{\omega_2 \tan \theta}{\omega}, \quad \psi_3 = \arctan \frac{\omega_3 \tan \theta}{\omega}$$

由于电流与电压不同, 如果故障前线路空载, 那么

可以认为 $i_f(t)$ 就是故障后电流, 含有基波分量、直流分量、频率为 ω_2 的高次谐波、频率为 ω_3 的高次谐波, 分别对应于式(17)中4个部分。

2 暂态过程各参数分析

对故障暂态电流、电压, 针对非周期分量和高次谐波分量(针对基于工频量的保护, 仅讨论 ω_2 高次谐波)进行分析。

2.1 非周期分量

暂态电压没有非周期分量。

暂态电流含有非周期分量, 其初始值与故障角度 θ (由于对称关系, 仅对 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围讨论) 相关。当 $\theta = 0^\circ$ 即电压过零点时故障, 非周期分量最大; 当 $\theta = 90^\circ$ 即电压波峰时故障, 非周期分量初始值为零, $\theta = 0^\circ$ 时非周期分量初始值为

$$\frac{K_2}{\omega} \left[\left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_2^2} \right) K_{\omega_2} - \left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_3^2} \right) K_{\omega_3} \right]$$

由于 $\omega^2 \ll \omega_2^2, \omega^2 \ll \omega_3^2$, 可以认为非周期分量初始值与基波幅值相同, 这和以往经验也是相符合的。

2.2 高次谐波的频率

对于式(11)高次谐波频率计算式, 结合晋东南—南阳—荆门 1000 kV 示范工程具体参数^①计算的高次谐波频率, 同时使用 EMTDC/PSCAD 仿真后用 Matlab 对暂态电流和电压进行频谱分析, 将仿真值和式(11)计算值进行对比, 结果如表1所示。

表1 高频频率对照表

Tab.1 Comparison of HF components

x/km	小方式 f_2/Hz		大方式 f_2/Hz	
	仿真	计算	仿真	计算
100	755	736	795	770
200	390	379	425	408
300	270	260	300	285
400	200	199	235	222
500	170	163	195	184
363	220	217	255	242

系统运行方式对应于晋东南背后系统运行方式。363 km 是实际工程中的晋东南—南阳线路长度, 所以单独列出。从表1的结果来看, 运用式(11)进行高次谐波频率的计算具有相当的实用性, 误差较小。同时从图6中可以看到, 故障距离相同时, 系统运行方式越小, 谐波频率越接近于工频; 背后系统运行方式一定时, 故障距离越大, 谐波频率越接近于工频。

2.3 高次谐波初始值

对于目前广泛应用的基于工频量保护原理, 常考虑的是离工频最近的高次谐波。

2.3.1 电压高次谐波

由式(15), 高次谐波电压幅值为

$$U_{\omega_2}(t) = -K_1 K_{\omega_2} \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2} \right) \sin^2 \theta + \frac{\omega^2}{\omega_2^2} \right]^{1/2} \quad (18)$$

该值与故障角度有关, $\theta = 0^\circ$ 时最小, $\theta = 90^\circ$ 时最大。最小值与最大值的比值为 ω/ω_2 , 即基波频率与高次谐波频率比值。

2.3.2 电流高次谐波

由式(17), 高次谐波电流幅值为

$$I_{\omega_2}(t) = \frac{K_2 K_{\omega_2}}{\omega_2} \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2} \right) \sin^2 \theta + \frac{\omega^2}{\omega_2^2} \right]^{1/2} \quad (19)$$

$\theta = 0^\circ$ 时最小, $\theta = 90^\circ$ 时最大。最小值与最大值的比值为 ω/ω_2 。

2.3.3 初始值

考虑最严重的情况, 即 $\theta = 90^\circ$ 时的故障条件。对于电压, 可以以额定电压为参考值来考虑, 也就是用 $\theta = 90^\circ$ 时高次谐波的初始幅值与 E_m 的比值 K_{I2N} 来考虑, 由于 $E_m = 1$, 所以结合式(18)和式(13):

$$K_{I2N} = -K_1 K_{\omega_2} = \frac{L_s}{A_5 (\omega_3^2 - \omega_2^2) (\omega_2^2 - \omega^2)} \quad (20)$$

而电流以对应基波电压幅值为参考值, 也就是用 $\theta = 90^\circ$ 时高次谐波的初始幅值与故障基波电流幅值的比值 K_{I2} 来考察。所以结合式(19)和式(17):

$$K_{I2} = \frac{K_2 K_{\omega_2}}{K_2 (K_{\omega_2} - K_{\omega_3})} \frac{\omega}{\omega_2} = \frac{\omega}{\omega_2} \frac{\omega_3^2 - \omega^2}{\omega_3^2 - \omega_2^2} \quad (21)$$

结合 1000 kV 线路参数运用式(20)(21)对不同故障距离和系统运行方式下 K_{I2N} 和 K_{I2} 进行计算, 结果如图5(a)(b)所示。

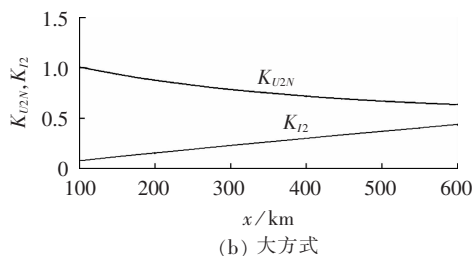
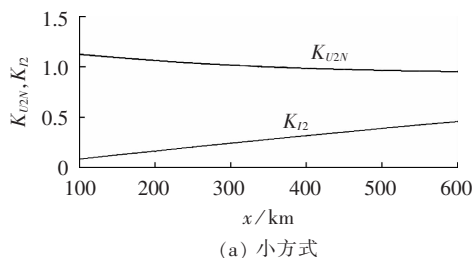


图5 故障高频分量初始值变化图

Fig.5 Initial value curves of HF components

从图5(a)(b)结果看, 暂态电流中 K_{I2} 随故障距离增大逐渐增大, 数值在 50% 以内。而 K_{I2N} 值随故障距离增大有所下降, 但一般大于 50%; 小方式的时候变化不大。值得注意的是, K_{I2N} 表明的是谐波与额定电压的比值, 而保护安装处的基波电压是下降的, 尤其在背后系统较小方式的时候下降得更加明显, 因此相对于故障后的基波电压, 高次谐波初始值非常大, 可以达到基波电压幅值的数倍, 也就是暂态电压中的高次谐波要比暂态电流严重得多。

3 仿真计算

仿真采用电磁暂态计算软件 EMTDC/PSCAD, 数

① 国家电网公司. 交流特高压试验示范工程二次系统研究用关键参数与边界条件. 2006.

据分析采用 Matlab。采用晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 示范工程参数,等值系统采用晋东南侧等值系统。仿真采用基于分布参数特性贝瑞龙模型。下面给出一些说明。

a. 由于暂态电气量中的高次谐波可能达到较高的频率,采用常规 1 200 Hz 的采样频率来做频谱分析可能会出现频率混叠。因此对仿真数据的采样频率为 4 800 Hz,可以对 0~2 400 Hz 内的信号数据进行有效分析。

因为仿真的主要目的是反映非周期分量和高次谐波与基波的对比,因此频谱图中每个信号的频谱系数 η 直接使用 FFT 指令求得,反映了整个数据窗中信号的整体强度,因而数值较大。

b. 为了提高频谱分析中频率的分辨率,仿真中对故障后 10 个周期内的信号进行频率分析,表 1 中仿真值便是据此得到的。

c. 由于暂态电气量中非周期分量和高次谐波都是衰减的,因此非周期分量和高次谐波的初始值与基波的比值要比频谱图中二者的频谱系数的对比值大,所以频谱图中非周期分量和高次谐波与基波分量的对比只能针对某一个数据窗内的整体对比。

考虑到衰减的因素,采用较短的数据窗可以更好地反映出非周期分量和高次谐波的严重程度,本文采用故障后 2 个周期仿真数据进行频谱分析。仿真条件 1~4 中考虑了不同的故障角度、故障距离和系统运行方式。

仿真条件 1:故障角度 90° ,故障距离 100 km,最小运行方式。仿真结果见图 6。

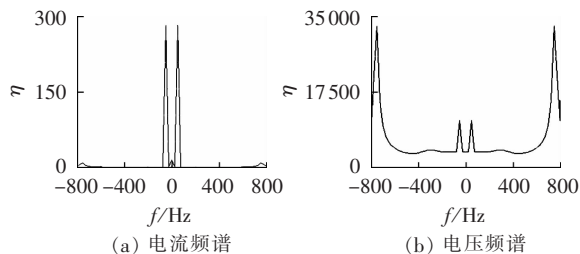


图 6 仿真 1 电流、电压频谱图

Fig.6 Current and voltage spectrums of simulation 1

仿真条件 2:故障角度 90° ,线路长度 300 km,最小运行方式。仿真结果见图 7。

仿真条件 3:故障角度 0° ,故障距离 300 km,最小运行方式。仿真结果见图 8。

仿真条件 4:故障角度 90° ,线路长度 300 km,最大运行方式。仿真结果见图 9。

从仿真中可以看到几个特点。

a. $\theta=0^\circ$ 时暂态电流中含有直流分量, $\theta=90^\circ$ 时直流分量为零;而暂态电压中没有直流分量。

b. $\theta=90^\circ$ 时暂态电压、电流中高频分量要明显严重,这与前面理论分析相符合。

c. 故障距离越大,高次谐波频率越接近于工频,

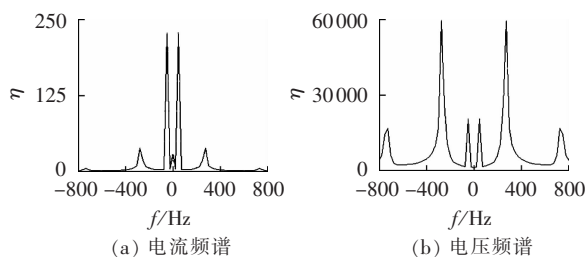


图 7 仿真 2 电流、电压频谱图

Fig.7 Current and voltage spectrums of simulation 2

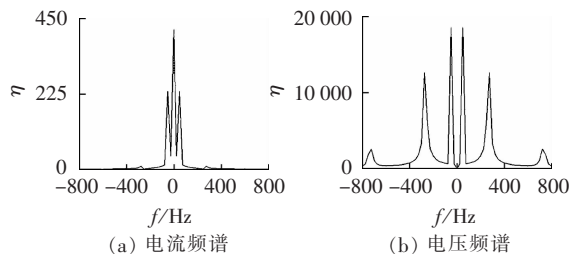


图 8 仿真 3 电流、电压频谱图

Fig.8 Current and voltage spectrums of simulation 3

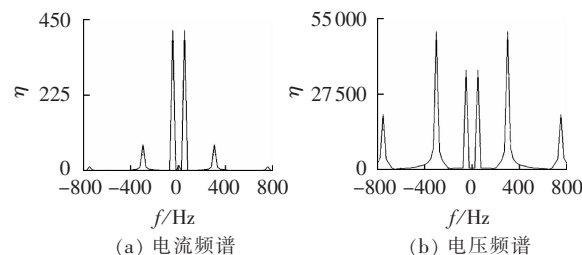


图 9 仿真 4 电流、电压频谱图

Fig.9 Current and voltage spectrums of simulation 4

相比之下,暂态电压中的高次谐波要远严重于暂态电流。以图 7 为例,2 个周期的频谱分析表明了暂态电流中谐波初始值只占基波的小部分(不到 50%),而暂态电压中的高次谐波却能达到基波的数倍,这与前面理论分析的结论是相符合的。

d. 系统运行方式对电压中高次谐波的影响比较明显,小方式时高次谐波要比大方式时严重,而基波电压却下降很多,因此从谐波与基波对比的角度而言,小方式时高次谐波更为严重,这与理论分析相符合。

4 并联电抗器的影响

4.1 理论分析

当考虑并联电抗器后,系统的附加网络如图 10 所示。

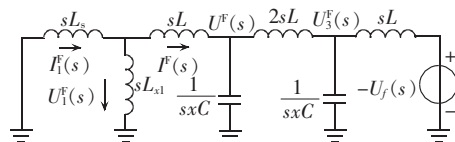


图 10 拉普拉斯等效电路

Fig.10 Equivalent Laplace circuit

图中, $L=xL_1/4$, $C=xC_1/2$, L_{x1} 为并联电抗器值,设 $L_m=L_s//L_{x1}+L$,那么:

$$\left(\frac{1}{sL_m}+sC+\frac{1}{2sL}\right)U^F(s)-\frac{1}{2sL}U_3^F(s)=0 \quad (22)$$

$$\left(\frac{1}{2sL} + sC + \frac{1}{sL}\right)U_3^F(s) - \frac{1}{2sL}U^F(s) = -\frac{U_f(s)}{sL} \quad (23)$$

$$U_1^F(s) = \frac{sL_m - sL}{sL_m}U^F(s) \quad (24)$$

由式(22)~(24)可以得到:

$$U_1^F(s) = -\frac{s \sin \theta + \omega \cos \theta}{s^2 + \omega^2} \frac{s(L_m - L)}{sA_1 + s^3A_3 + s^5A_5} \quad (25)$$

式(25)中的 A_1 、 A_3 、 A_5 与式(8)中相同,对于 $L_m - L = L_s // L_{x1}$,特高压线路由于线路高抗补偿度一般较高,要远大于背后系统的等值阻抗值,以晋东南—南阳—荆门示范工程线路为例, L_s / L_{x1} 的最大值为 22%,而一般的情况下只在 6% 左右。因此 $L_s // L_{x1}$ 在数值上小于 L_s ,但相差并不会很大,所以由式(25)分析的暂态分量与式(8)分析出的暂态分量数值不会相差很大,同样电流暂态分量也遵循相同的特征。从理论上分析,并联电抗器对相关暂态分量的作用不会很明显。

4.2 仿真实验

仿真分析了带有并联电抗器时相关暂态分量的波形和频谱。

仿真条件 5:故障角度 90° ,故障距离 300 km,最小运行方式。仿真结果见图 11。

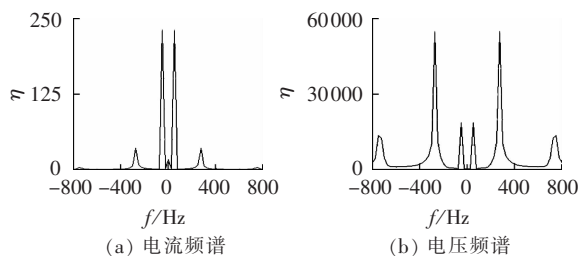


图 11 仿真 5 暂态电流、电压频谱图

Fig.11 Current and voltage spectrums of simulation 5

仿真条件 6:故障角度 0° ,故障距离 300 km,最小运行方式。仿真结果见图 12。

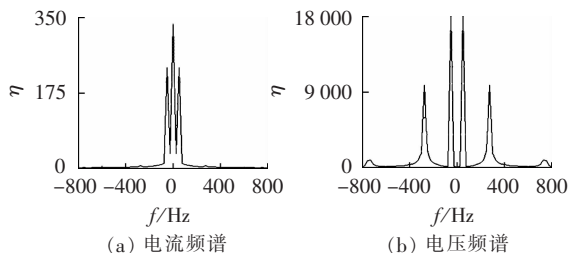


图 12 仿真 6 暂态电流、电压频谱图

Fig.12 Current and voltage spectrums of simulation 6

仿真条件 5 和仿真条件 6 采用的是晋东南侧最小运行方式,此时 L_s / L_{x1} 约为 22%,这是示范工程中出现的 L_s / L_{x1} 最大值。

对比仿真条件 5 与仿真条件 2、仿真条件 6 与仿真条件 3,可以看到由于并联电抗器的存在,故障前的负荷电流大幅减小,但从频谱图上看,无论是非周期分量还是高次谐波,相对基波而言还是非常严重。虽有一定程度的减小,但程度并不明显,仿真结果与理论分析的结论是相符合的。仿真中 L_s / L_{x1} 较大,而

一般这个值仅 6% 左右,并联电抗器对暂态分量的作用就更不明显。

5 相关问题展望

a. 不对称故障暂态过程。其中相间故障与三相对称故障一样,不涉及到零模分量,而接地故障则涉及到零模分量^[8-9],但从以往的高压和超高压线路经验和仿真看,一般不对称故障暂态过程没有三相故障明显,其暂态过程有待分析。

b. 相对而言电流中非周期分量较为严重,而电压中高次谐波较为严重,如果故障距离较近,那么高次谐波频率较高,一般通过前置低通滤波器加上相关的数字滤波算法后就能够得到有效的处理。但如果故障较远,高次谐波的频率较为接近于工频,暂态电压中的高次谐波就较为难处理,而由于特高压线路的输电距离较远,这时候故障点又很有可能处在相关保护原理的边界上,因此必须采取可靠的滤波措施来处理较为严重的暂态谐波。针对不同的保护原理非周期分量和高次谐波的影响,有待进一步分析。

c. 特高压线路是我国未来网架的骨干,快速处理其故障对于维持电网的安全稳定性有着重要作用,但其暂态特性又较为丰富,兼顾安全性和快速性两方面的要求将是特高压线路保护研究的重要问题。

6 结论

本文详细分析了特高压线路对称故障后非周期分量和高次谐波的特点和影响因素。

a. 暂态电压中没有非周期分量;暂态电流中含有衰减的非周期分量,其初始值与故障角度 θ 相关, $\theta = 0^\circ$ 初始值最大,与基波幅值基本相等, $\theta = 90^\circ$ 时为零。

b. 暂态电压和电流中都含有高次谐波,在系统运行方式和故障距离相同时,高次谐波的幅值在 $\theta = 0^\circ$ 时最小, $\theta = 90^\circ$ 时最大;谐波的频率受到故障距离和保护背后系统运行方式影响,故障距离越远、系统方式越小,谐波的频率越接近于工频量,故障距离 500 km 以内出现的最接近工频的高次谐波的频率在 170 Hz 以上。

c. 暂态电流中高次谐波的初始幅值与基波幅值比值随着故障距离的增大而增大, $\theta = 90^\circ$ 时 500 km 以内比值在 50% 以内。

d. 暂态电压中的高次谐波初始幅值随着故障距离的增大是减小的,但相对于基波电压的降低,其降低程度小得多,因此高次谐波电压要比电流严重。通过理论分析和仿真计算, $\theta = 90^\circ$ 时高次谐波的电压初始值可以达到基波电压的数倍。

e. 并联电抗器由于数值要比系统阻抗大得多,因此对暂态分量的作用不明显。

参考文献:

[1] 贺家李,李永丽,郭征,等. 特高压输电线路继电保护配置方案:(一)

- 特高压输电线的结构与运行特点[J]. 电力系统自动化,2002,26(23): 1-6.
- HE Jiali, LI Yongli, GUO Zheng, et al. Relay protection for UHV transmission lines: part one construction and operation characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 1-6.
- [2] 王宾, 董新洲, 薄志谦, 等. 零序电抗继电器在特高压交流输电线路上的适用性分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 46-50.
- WANG Bin, DONG Xinzhou, BO Zhiqian, et al. Analysis on the zero-sequence reactance relay application in UHV AC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 46-50.
- [3] 王宾, 董新洲, 周双喜, 等. 特高压交流输电线路接地阻抗继电器动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 45-49.
- WANG Bin, DONG Xinzhou, ZHOU Shuangxi, et al. Analysis on the ground-impedance relay operation characteristics for UHV AC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(17): 45-49.
- [4] 贺家李, 李永丽, 李斌, 等. 特高压输电线路继电保护配置方案(二)保护配置方案[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 1-6.
- HE Jiali, LI Yongli, LI Bin, et al. Relay protection for UHV transmission lines: part two disposition of relay protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 1-6.
- [5] 李斌, 李永丽, 贺家李, 等. 750 kV 输电线路保护与单相重合闸动作的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 73-76.
- LI Bin, LI Yongli, HE Jiali, et al. The study on protective relay and single-phase reclosure of 750 kV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(13): 73-76.
- [6] 柴济民, 郑玉平, 吴通华. 交流 1000 kV 特高压输电线路距离保护特殊问题[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 55-60.
- CHAI Jimin, ZHENG Yuping, WU Tonghua. Problems in the distance relay for 1000 kV UHV AC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(12): 55-60.
- [7] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2006: 69-80.
- [8] 黄少锋, 王兴国, 刘千宽. 一种基于固有频率的长距离输电线路保护方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 59-63.
- HUANG Shaofeng, WANG Xingguo, LIU Qiankuan. Natural frequency based protection scheme for long distance transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 59-63.
- [10] 黄少锋, 王兴国. 一种基于固有频率的超高压线路相间保护方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 58-62.
- HUANG Shaofeng, WANG Xingguo. Phase-to-phase protection scheme of EHV transmission line based on natural frequencies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 58-62.

(编辑: 李育燕)

作者简介:

柴济民(1983-), 男, 安徽安庆人, 助教, 硕士, 从事电力系统的教学和研究工作(E-mail: cjmrelays@gmail.com);

吴通华(1977-), 男, 浙江丽水人, 工程师, 硕士, 从事电力系统继电保护的研究与开发工作;

郑玉平(1964-), 男, 福建莆田人, 教授级高级工程师, 博士, 从事电力系统继电保护的研究与开发工作。

Transient analysis for three-phase fault of 1000 kV UHV AC transmission lines

CHAI Jimin¹, WU Tonghua², ZHENG Yuping²

(1. Department of Electronic and Electrical Engineering,

Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: The transient current and voltage of UHV AC transmission lines under three-phase fault are theoretically analyzed and simulated. There are HF(High Frequency) components and decaying DC components in fault current, while there are only HF components in fault voltage. The initial value of fault HF component is related to fault POW(Point On Wave) and it is the highest when POW is 90°. The frequency of HF component is related to fault location and system operating mode. The smaller the system short circuit capacity is and the farther the fault location is, the closer the harmonic frequency will be to the fundamental one. The farther the fault location is, the larger the HF component will be. The HF harmonics of fault voltage are more serious than those of fault current under the same fault condition. Shunt reactors can reduce the steady capacitive current but have unobvious effect on fault transient current.

Key words: UHV transmission line; aperiodic component; high frequency component; relay protection