

特高压线路参数对线路谐波传递系数的影响

刘书铭, 徐永海, 朱永强, 肖湘宁

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Impact of Transmission Line Parameters on Harmonic Transmission Coefficients in 1 000 kV AC Power Transmission System

LIU Shu-ming, XU Yong-hai, ZHU Yong-qiang, XIAO Xiang-ning

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: The harmonic transmission in 1000kV power transmission line is researched. In this research the uniform transmission line is chosen as 1000kV transmission line model and the formula of harmonic transmission coefficients are derived. In the modeling the comparative analysis on transmission line models which are respectively represented by lumped parameters and distributed parameters is carried out, and the impacts of different line parameters on the variation law of harmonic transmission coefficients is researched, meanwhile the tendency chart of influence of terminal load variation of transmission line on variation of harmonic transmission coefficients is given. Research results show that there is a complex relation between variation of harmonic transmission coefficient and different parameters and loads of transmission line.

KEY WORDS: ultra high voltage; transmission line parameters; harmonic transmission

摘要: 选用均匀传输线路为特高压线路模型, 推导了谐波传递系数的公式, 对以分布参数表示的线路模型和以集中参数表示的线路模型进行了比较分析, 研究了不同线路参数对谐波传递系数变化规律的影响, 同时给出了线路终端负载变化对谐波传递系数的影响趋势图。

关键词: 特高压; 线路参数; 谐波传递

0 引言

随着特高压输电系统的发展, 特高压线路的谐波传输特性受到越来越多的关注^[1-3]。和传统的输电系统相比, 特高压系统无论是线路参数还是系统的各种元件, 均有其特殊之处, 这使得谐波传输也有其特殊性^[4-5], 因此, 对 1 000 kV 特高压系统谐波传输特性的研究是十分有意义的。影响谐波传递系数 T_h 的因素很多, 文献[6]分析了谐波次数和传输距离

对 T_h 的影响, 本文在文献[6]的基础上对特高压线路不同的等值模型和线路参数进行比较分析, 并研究了负载变化对谐波传递系数的影响。

1 特高压线路模型和公式推导

1.1 特高压线路模型

和传统的高压线路不同, 特高压输电线路由于采用了多分裂导线, 输电距离也比其它高压线路长得多, 一般达数百 km, 因此在建模过程中, 以集中参数表示的 π 型电路无法准确等值特高压线路。考虑其分布参数特性, 用双曲函数计算等值电路参数将更为合理, 每条线路只需 1 个等值 π 型电路即可^[7-8]。本文采用的特高压输电线路的等值模型如图 1 所示。

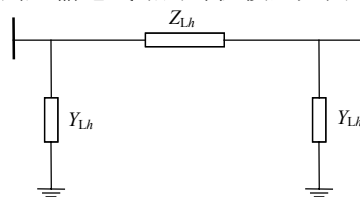


图 1 输电线路的等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of the transmission lines

图 1 中的线路阻抗参数可由下式表示:

$$Z_{Lh} = Z_{Ch} \sinh(\gamma_h l) \quad (1)$$

$$Y_{Lh} = \frac{\cosh(\gamma_h l) - 1}{Z_{Ch} \sinh(\gamma_h l)} \quad (2)$$

式中: Z_{Ch} 、 γ_h 分别为对应于 h 次谐波的线路特征阻抗和传播常数, 均为复数; l 为线路长度。 Z_{Ch} 和 γ_h 可由下式求得:

$$Z_{Ch} = \sqrt{z_{0h}/y_{0h}} \quad (3)$$

$$\gamma_h = \sqrt{z_{0h}y_{0h}} \quad (4)$$

式中 z_{0h} 、 y_{0h} 分别为对应于 h 次谐波单位长度线路的阻抗和导纳, 其电导部分一般可忽略不计。单位

长度线路的谐波参数^[9]为

$$z_{0h} = r_{0h} + jhx_{01} = 0.288r_{01} + 0.138\sqrt{hr_{01}} + jhx_{01} \quad (5)$$

$$y_{0h} = jhb_{01} \quad (6)$$

式中 r_{01} 、 x_{01} 、 b_{01} 分别为线路的单位电阻、电抗和电纳。

由以上公式可以看出,随着谐波次数和线路距离的增大,该等值电路中的阻抗和导纳与集中参数电路有明显不同,不仅数值有变化,而且性质也可能发生变化。如电路的导纳 Y_{1h} 数值将不再是纯虚数,而是出现了实数项,说明导纳参数已不再是纯电纳,而是出现明显的电导部分,即此时线路的电导参数已不能再忽略。

1.2 谐波传递系数的公式推导

对于图 1 所示的等值电路,由文献[10]可知,长度为 l 的三相对称输电线路,对应于其 h 次谐波,有如下电路方程:

$$\begin{cases} \dot{U}_{2h} = \dot{U}_{1h} \cosh(\gamma_h l) - Z_{Ch} \dot{I}_{1h} \sinh(\gamma_h l) \\ \dot{I}_{2h} = \dot{I}_{1h} \cosh(\gamma_h l) - \frac{\dot{U}_{1h}}{Z_{Ch}} \sinh(\gamma_h l) \end{cases} \quad (7)$$

式中 \dot{U}_{1h} 、 \dot{U}_{2h} 、 \dot{I}_{1h} 、 \dot{I}_{2h} 分别为线路始、末端 h 次谐波电压和电流。若在线路始端有 h 次谐波电流源 \dot{I}_{1h} ,经线路传输 l 距离后流入线路末端的 h 次谐波电流为 \dot{I}_{2h} ,由式(7)可得

$$T_h = \frac{\dot{I}_{2h}}{\dot{I}_{1h}} = \cosh(\gamma_h l) - \frac{\dot{U}_{2h}/\dot{I}_{1h} \sinh(\gamma_h l)}{Z_{Ch}} = \cosh(\gamma_h l) - \frac{Z_{1h} \sinh(\gamma_h l)}{Z_{Ch}} \quad (8)$$

式中: Z_{1h} 为对应于 h 次谐波的传输线路阻抗,它会根据终端所接负载的不同而变化。当线路终端不接负载时,距终端距离为 l 处的传输阻抗^[11]为

$$Z_{1h} = Z_{Ch} \tanh(\gamma_h l) \quad (9)$$

考虑谐波源和负荷的特高压输电线路的谐波等效电路模型如图 2 所示。

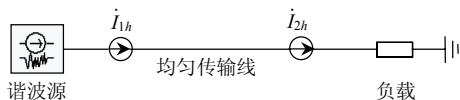


图 2 均匀传输线路

Fig. 2 Uniform transmission line

2 线路模型对传递系数的影响

为了比较以集中参数表示的线路模型和以分布参数表示的线路模型对谐波传递系数的影响,以国内的特高压输电示范线路为例进行仿真。已知该线路长度为 363 km,导线为水平排列方式,其线路

参数如表 1 所示^[12]。

表 1 特高压输电线路参数

Tab. 1 Parameters of 1000 kV power transmission line

项目	电阻/(Ω/km)	感抗/(Ω/km)	电容/(μF/km)
正序	0.008 27	0.262 98	0.014 00
零序	0.217 53	0.738 97	0.009 51

以分布参数为线路模型,线路空载时,根据式(8)用 Matlab 计算可得谐波传递系数的变化趋势如图 3 和表 2 所示。经 PSCAD 仿真所得 T_h 与 h 数值关系如表 3 所示。

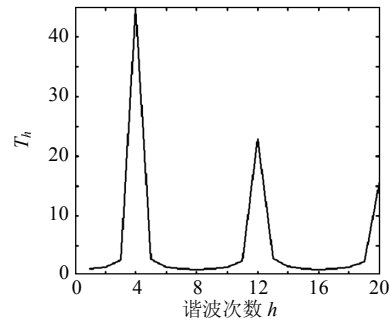


图 3 谐波次数对传递系数的影响

Fig. 3 The influence of harmonic order on harmonic transmission coefficients

表 2 谐波传递系数计算值

Tab. 2 Calculated value of harmonic transmission coefficients

h	1	3	5	7	9
T_h	1.081 4	2.568 4	2.682 2	1.089 3	1.072 9
h	11	13	15	17	19
T_h	2.456 0	2.803 3	1.097 8	1.065 0	2.354 4

表 3 谐波传递系数与谐波次数的关系

Tab. 3 The relation between harmonic transmission coefficients and harmonic orders

h	1	3	5	7	9
T_h	1.089 1	2.597 7	2.748 0	1.095 2	1.081 3
h	11	13	15	17	19
T_h	2.540 5	2.955 7	1.110 4	1.078 0	2.464 0

比较表 2 和表 3 可知,以分布参数为线路模型时,利用 Matlab 和 PSCAD 仿真后的结果非常接近,差别在 3%以内,因此,计算所得的 T_h 值及变化规律是正确的。

由于以集中参数表示的线路模型只适用于距离较短的线路,当线路距离较长时需增加等值 π 模型串接的数目。特高压线路每 15~20 km 的距离就需一个等值 π 模型来表示^[13]。利用 PSCAD 仿真时选用每个等值 π 模型表示 20 km,串接 18 个 π 模型来表示实际线路长度,所得传递系数仿真值如表 4 所示。

比较表 2 和表 4 可知,以集中参数为线路模型所得传递系数的仿真值与计算值的差别将高达

表4 谐波传递系数的仿真值
Tab. 4 The simulation value of harmonic transmission coefficients

h	1	3	5	7	9
T_h	1.082 9	2.590 8	2.908 8	1.108 8	1.081 9
h	11	13	15	17	19
T_h	2.501 2	3.085 5	1.122 8	1.081 6	2.608 2

9.7%，在精确性上不如以分布参数为模型所得的结果，故在研究特高压线路的问题时应当选用分布参数模型作为线路模型。

3 线路参数对传递系数的影响

线路参数不同即线路的单位阻抗和导纳值不同对传递系数的影响是很大的^[14-15]。线路的参数主要取决于所选线路的材料，如导线的直径、分裂根数以及排列方式。下面以表5所示的线路参数^[10]为例分析传递系数的变化情况。

表5 线路参数
Tab. 5 Parameters of transmission lines

分裂导线数	单位电阻/(Ω/km)	单位电抗/(Ω/km)	单位电纳/(μS/km)
1	0.27	0.412	2.76
4	0.026	0.281	3.956
8	0.008 27	0.262 98	4.398 2

根据表5的线路参数，利用Matlab工具所得在线路长度 $l=600$ km 的情况下，所接负载为 $Z_{2h}=2+j50\Omega$ 时传递系数的变化趋势如图4所示。

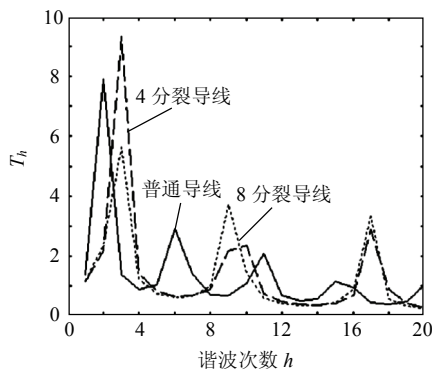


图4 线路参数对谐波传递系数的影响
Fig. 4 The influence of line parameters on harmonic transmission coefficients

由图4可知线路参数对谐波传递系数的影响是比较复杂的，在某次谐波采用分裂导线时传递系数比较小而其他次谐波可能采用普通导线时的传递系数比较小，线路参数的变化对谐波传递系数的影响没有统一的规律。

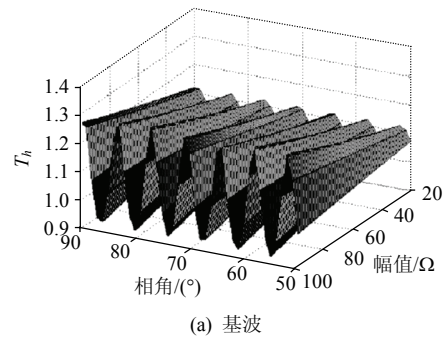
4 线路终端负载的变化对传递系数的影响

文献[11]中指出如果线路终端负载为 $Z_{2h} =$

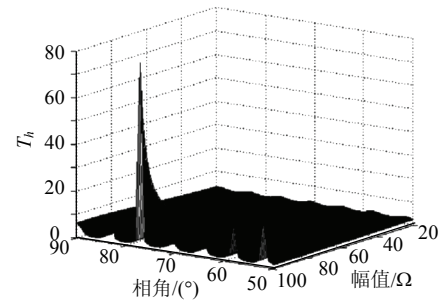
$Z_{Ch} \coth(\sigma)$ ，则线路首端的输入阻抗为 $Z_{1h} = Z_{Ch} \coth(\sigma + \gamma_h l)$ ，其中 σ 为复数，将 Z_{1h} 用 Z_{2h} 表示，可得

$$Z_{1h} = Z_{Ch} \frac{Z_{2h} + Z_{Ch} \tanh(\gamma_h l)}{Z_{Ch} + Z_{2h} \tanh(\gamma_h l)} \quad (10)$$

可见线路终端负载 Z_{2h} 的变化将影响线路输入阻抗的大小从而影响传递系数 T_h 。由于特高压线路3、5次谐波含量比较大^[16-17]，本文仅分析基波以及3次谐波的情况下传递系数的变化情况。选取负载阻抗的幅值在20~100Ω、相角在50°~90°变化，所得图形如图5所示。



(a) 基波



(b) 3次谐波

图5 负载变化对传递系数的影响

Fig. 5 Influence of load variation on harmonic transmission coefficients

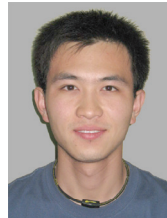
由图5可知基波时，传递系数会随着相角的变化而周期性的变化，并且随着幅值的降低传递系数呈单调减小的趋势；3次谐波也表现出这种规律，同时还可以看出，在 $Z_{2h} = 100\angle 78^\circ \Omega$ 时出现严重的谐波放大现象， T_h 值高达79。

5 结论

在特高压电网谐波传输问题的研究中，线路模型应选用以分布参数表示的等值电路模型。随着线路参数和线路终端负载的不同，传递系数的变化比较复杂，没有固定的变化规律。基频时传递系数随线路终端负载的变化比较明显，会随着负载幅值的增加而单调变大、随着负载相角的增大而呈现周期性的变化。

参考文献

- [1] 苏童, 董新洲. 特高压带并联电抗器线路的行波差动保护[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 41-44.
Su Tong, Dong Xinzhou. Traveling-wave differential protection on UHV transmission line with shunt reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 41-44(in Chinese).
- [2] 干喆渊, 张小武, 张广州, 等. 特高压输电线路对调幅广播台站的无源干扰[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 9-12.
Gan Zheyuan, Zhang Xiaowu, Zhang Guangzhou, et al. Passive interference in receiving stations of AM broadcasting caused by UHVAC transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 9-12(in Chinese).
- [3] 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(in Chinese).
- [4] 李蔚森, 陈晓燕. 500 kV 和 220 kV 系统电压谐波水平之间关系的探讨[J]. 电网技术, 2002, 26(6): 49-52.
Li Shusen, Chen Xiaoyan. Relationship between harmonics voltage levels of 500 kV and 220 kV network[J]. Power System Technology, 2002, 26(6): 49-52(in Chinese).
- [5] 刘云, 蒋卫平, 印永华, 等. 特高压交直流大电网的数模混合实时仿真系统建模[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 52-56.
Liu Yun, Jiang Weiping, Yin Yonghua, et al. Modeling of analogue-digital hybrid real-time simulation system applied in the UHV AC/DC great power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 52-56(in Chinese).
- [6] 国家电网公司. 特高压系统谐波特性分析及潜供电流对重合闸的影响研究报告[R]. 北京: 国家电网公司, 2008.
- [7] 邱关源. 电路理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 426-431.
- [8] 吴竞昌. 供电系统谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 241-242.
- [9] 文康珍, 黎文安. 高压电力系统谐波渗透及谐波限制值的确定[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(4): 14-17.
Wen Kangzhen, Li Wenan. Harmonic penetration and determination of harmonic limit values for a high-voltage system[J]. Journal of WUT, 2002, 24(4): 14-17(in Chinese).
- [10] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995: 62-68.
- [11] 王锐, 李瑞生, 李文霞. 特高压交流 1 000 kV 示范工程故障电流谐波分析[J]. 继电器, 2007, 35(23): 1-4.
Wang Rui, Li Ruisheng, Li Wenxia. Fault current harmonic analysis of 1 000 kV UHV AC power transmission demonstration project [J]. Relay, 2007, 35(23): 1-4(in Chinese).
- [12] 张晓莉, 周泽昕, 王玉玲, 等. 1 000 kV 交流输电系统动态模型研究[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 1-4.
Zhang Xiaoli, Zhou Zhexi, Wang Yuling, et al. Study on dynamic simulation of 1 000 kV AC power transmission system[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 1-4(in Chinese).
- [13] 沈冰. 超(特)高压输电线路的保护原理与技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [14] 杨晓妮, 韩民晓, 陈青. 高压交流系统谐波限制研究[J]. 电气应用, 2008, 27(4): 75-78.
Yang Xiaoni, Han Minxiao, Chen Qing. Study on limits of harmonic of the high voltage network[J]. Electrotechnical Application, 2008, 27(4): 75-78(in Chinese).
- [15] 余涛, 史军, 任霞. 交直流并联输电系统的间谐波研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 128-132.
Yu Tao, Shi Jun, Ren Xia. Interharmonic in AC/DC hybrid transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 128-132(in Chinese).
- [16] 张志强, 韩先才, 班连庚, 等. 1 000 kV 交流特高压示范工程变电站 110 kV 侧电容器组串抗率分析[J]. 中国电力, 2007, 40(2): 36-41.
Zhang Zhiqiang, Han Xiancai, Ban Liangeng, et al. The analyses of capacitor series reactance rate at 110 kV side in 1 000 kV UHV AC substations[J]. Electric Power, 2007, 40(2): 36-41(in Chinese).
- [17] 林集明, 王晓刚, 班连庚, 等. 特高压空载变压器的合闸谐振过电压[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 5-10.
Lin Jiming, Wang Xiaogang, Ban Liangeng, et al. Resonance overvoltage caused by energizing no-load transformers in 1 000 kV AC transmission system[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 5-10(in Chinese).



刘书铭

收稿日期: 2009-02-20。

作者简介:

刘书铭(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制、电力系统谐波分析与综合治理, E-mail: losuwing@126.com;

徐永海(1966—), 男, 博士, 教授, 目前从事电力系统谐波、电能质量方面的研究工作;

朱永强(1975—), 男, 博士, 副教授, 现从事

电能质量和新能源方面的研究工作;

肖湘宁(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电能质量和电力电子方面的研究工作。

(编辑 褚晓杰)