

± 800 kV 特高压直流换流站二次设备 回路传导电磁干扰特性

罗汉武¹, 乐 健², 毛 涛³, 李猛克¹, 徐新尧¹, 崔士刚¹

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司检修分公司, 内蒙古 通辽 028000;

2. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 3. 武汉东湖学院 机电工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 对 ±800 kV 特高压直流换流站二次设备回路传导电磁干扰特性进行了分析, 为采取相关电磁干扰防护措施提供依据。建立了包括换流阀、换流变、平波电抗器和交直流滤波器在内的直流换流站一次回路宽频等效电路, 分析了各运行工况下一次回路传导电磁干扰特性, 结合所建立的电流互感器和二次电缆宽频模型, 进行了不同工况下二次回路传导电磁干扰特性的分析, 研究了电缆长度、负载率等对电磁干扰特性的影响。

关键词: 特高压直流输电; 换流站; 电流互感器; 宽频等效电路; 二次设备回路; 传导电磁干扰

中图分类号: TM 721.1; TM 723; O 441 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.026

0 引言

特高压直流输电系统因其容量大、损耗小、占用土地少, 在远距离电力输送中起到越来越重要的作用^[1-3]。根据国家电网公司总体规划, 2015 年已开始“五交八直”特高压工程建设。

特高压直流换流站的电磁环境十分复杂, 随着输电电压等级的进一步提高, 换流阀电气应力将增加, 导致电磁干扰强度进一步增大^[4-5]。以换流阀为干扰源的传导电磁干扰沿着一次回路主设备传播, 并通过耦合路径对二次设备回路产生复杂干扰^[6-8]。二次系统中包含保护、控制、监测、通信等各种设备, 其对换流站的安全运行具有至关重要的作用。分析特高压直流换流站二次设备回路的传导电磁干扰特性, 并结合现有相关标准^[9]查找二次设备薄弱环节, 针对性地制定电磁干扰防护措施, 对从电磁兼容性领域出发确保特高压直流输电系统的安全稳定运行具有重要的理论和工程实用价值。

目前相关研究大多集中于换流站一次系统的宽频建模和传导干扰水平评估。文献[10]提出了关键设备的宽频等值电路, 基于时域宽频等值电路的仿真计算方法, 对换流站稳态运行过程、传导干扰特性及其传播过程进行了仿真分析。文献[11]基于实测数据, 采用布隆法进行网络综合, 得到了阀组件宽频等效电路, 建立了高压直流换流站的宽频仿真模型。一次回路干扰通常经电流互感器等传感设备耦合至二次回路, 文献[12]分析了高压母线电磁干扰通过电流互感器以及一次侧和二次侧之间的寄生电容耦合至二次侧的特性。文献[13]研究了经电流互感器等传导至变电站二次设备的电磁干扰特性, 分析了干扰产生的原因, 并从系统软件和硬件设计角度出

发提出了提高系统抗干扰能力的措施。但上述文献均未建立完整精确的电流互感器宽频等效电路, 从而影响了二次回路传导电磁干扰分析的准确性。

本文以蒙东扎鲁特—青州±800 kV 特高压直流输电工程为研究对象, 结合其一次回路结构特点和主设备参数, 建立包含换流阀、换流变、平波电抗器和交直流滤波器等主设备在内的一次回路宽频等效电路, 建立了完整的电流互感器和二次电缆宽频模型, 分析了不同运行工况下一次和二次回路的传导电磁干扰特性, 研究了不同因素对二次设备回路传导电磁干扰特性的影响。

1 一次回路宽频等效电路

蒙东扎鲁特—青州特高压工程输电电压等级为 ±800 kV, 双极输电容量为 10 000 MW, 采用双极接线, 每极由双 12 脉动阀组串联连接, 每个脉动阀组单独设 1 个阀厅, 每个换流站共有 4 个阀厅。高压和低压阀厅内均有 6 座阀塔。本文采用基于 PSCAD 的时域电路计算方法, 对换流阀稳态运行时频繁开通、关断过程产生的电磁干扰进行仿真计算。扎鲁特换流站整体宽频等效电路的拓扑结构如图 1 所示。

1.1 换流阀

扎鲁特换流站换流阀额定电流为 6 250 A, 每个阀厅包含 6 个阀模块, 各阀模块通过寄生电容耦合成 1 个阀厅的宽频等效电路, 如图 2(a)所示。图 2(b)给出了最基本单元的晶闸管宽频等效电路, 其中考虑了晶闸管本体、水冷电阻、饱和电抗器、均匀电容和阻容吸收回路的影响。

1.2 换流变压器

图 3 为单相双绕组换流变压器宽频等效电路。低频特性主要考虑了励磁阻抗(R_{mp} 、 L_{mp})、一次侧和二次侧漏阻抗(R_{k1} 、 L_{k1} 、 R_{k2} 、 L_{k2})的影响。高频特性主

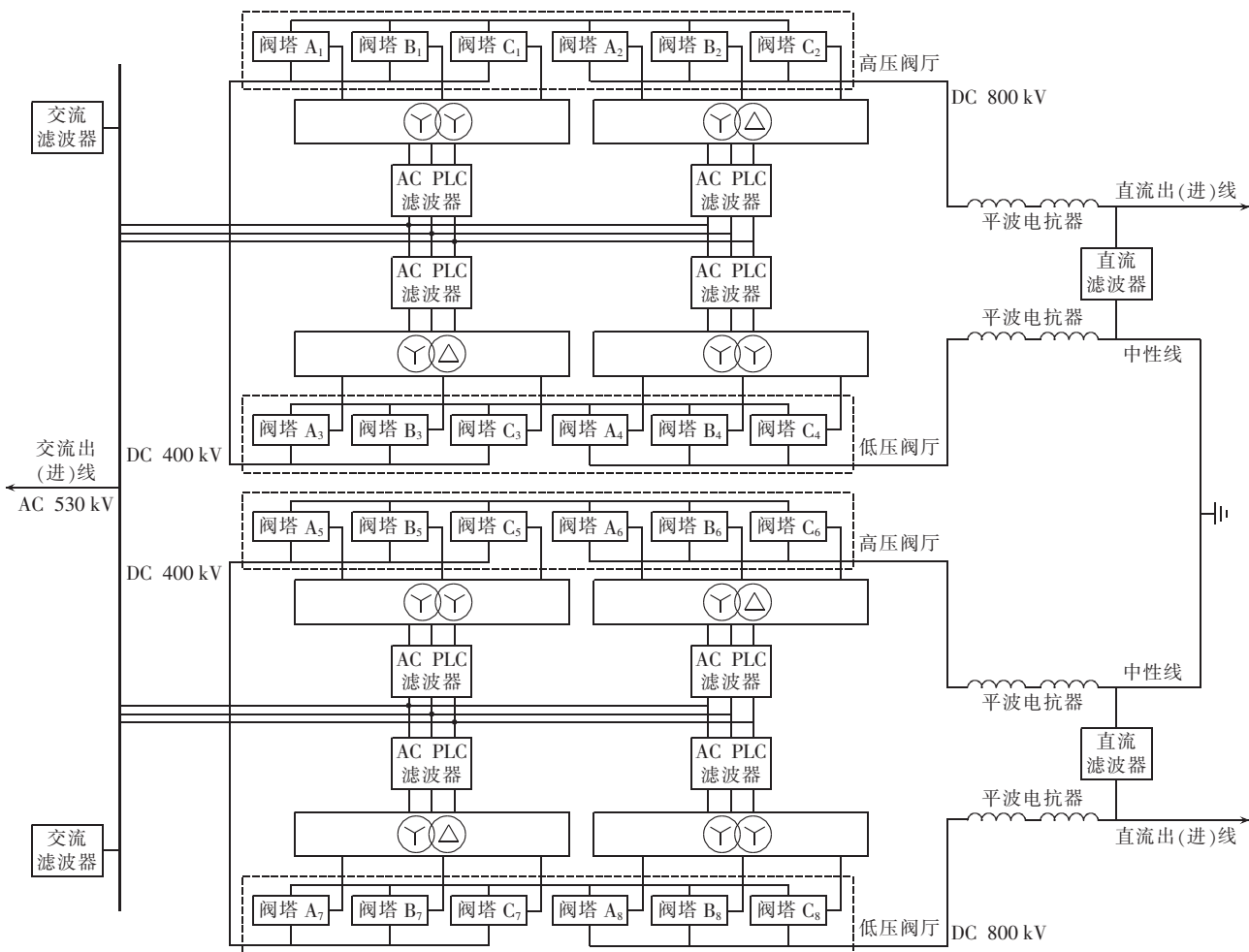


图 1 扎鲁特换流站整体宽频等效电路
Fig.1 Broadband equivalent circuit of Zhaluote converter station

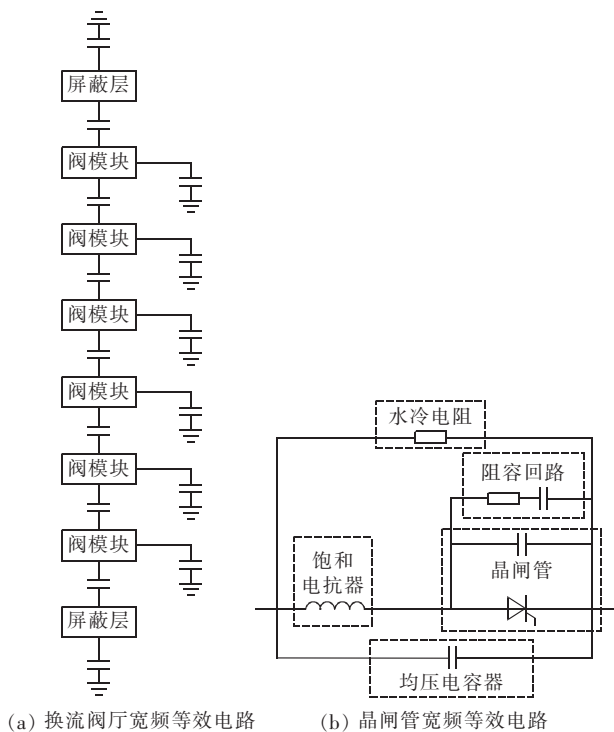


图 2 换流阀宽频等效电路
Fig.2 Broadband equivalent circuit of converter valve

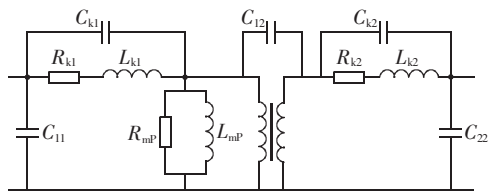


图 3 换流变压器宽频等效电路
Fig.3 Broadband equivalent circuit of converter transformer
要考虑了寄生电容的影响,包括一次侧绕组对地寄生电容 C_{11} 、二次侧绕组对地寄生电容 C_{22} 、一二次侧绕组之间的寄生电容 C_{12} 、一二次侧绕组的匝间电容 C_{k1} 和 C_{k2} 。

1.3 平波电抗器

图 4 为平波电抗器宽频等效电路,其中考虑了主电感 L_{mp} 、损耗电阻 R_{mp} 、对地电容 C_g 以及绕组中

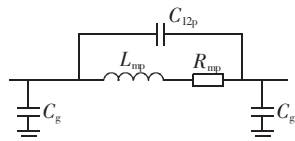


图 4 平波电抗器宽频等效电路
Fig.4 Broadband equivalent circuit of smoothing reactor

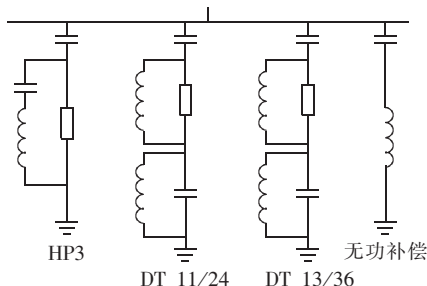
间的电容 C_{12p} 的影响。

1.4 滤波器

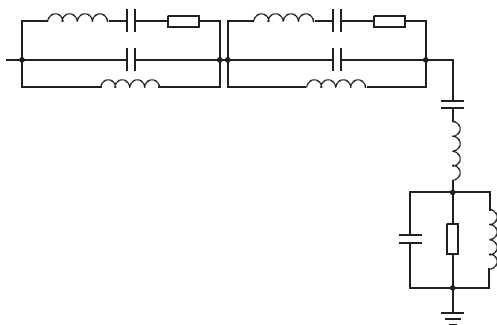
图 5 给出了直流、交流和交流 PLC 滤波器的宽频等效电路。图中,直流滤波器结构的确定应以直流线路所产生的等效干扰电流为基础;交流滤波器一般分为 2 种,除调谐滤波器外还要配置并联电容器以提供无功功率;换流站内的 PLC 滤波器可分为直流和交流 2 种,其中交流 PLC 滤波器必须并联安装在换流变压器交流网侧出口引线上。



(a) 直流滤波器宽频等效电路



(b) 交流滤波器宽频等效电路



(c) 交流 PLC 滤波器宽频等效电路

图 5 滤波器宽频等效电路

Fig.5 Broadband equivalent circuit of filters

2 电流互感器及二次电缆宽频等效模型

2.1 电流互感器

电流互感器的一次绕组与一次回路串联,二次回路有测量、继电保护以及电能计量装置接入。±800 kV 特高压直流输电工程所采用的电流互感器宽频等效电路如图 6 所示。

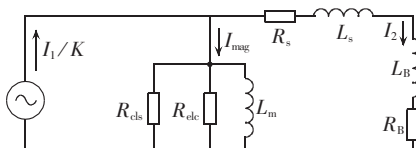


图 6 电流互感器宽频等效电路

Fig.6 Broadband equivalent circuit of current transformer

图 6 中,励磁阻抗主要由涡流损耗的电阻 R_{chs} 、额外损耗的非线性电阻 R_{elc} 、磁滞损耗和磁化电流的

非线性电感 L_m 三部分构成; R_s 和 L_s 为二次侧的漏阻抗; R_B 和 L_B 为负载; K 为电流互感器绕组匝数比。

电流互感器中的铁芯采用的材料有硅钢片、坡莫合金和超微晶合金,具有很好的磁化效果。这些铁磁质的矫顽力很小,一般矫顽力 $H_c \approx 1 \text{ A/m}$,在交变磁场中的磁滞损耗很小,可忽略磁滞的影响。

各元件参数计算如下:

$$R_{elc} = \frac{N^3 S I_{elc}}{L^2 k_2^2} \quad (1)$$

$$R_{chs} = \frac{U_\phi^2}{P_d} = \frac{12 \rho N^2 S}{d^2 L} \quad (2)$$

$$L_m = \frac{(1-b|B|)^2}{c} N^2 S \frac{1}{L} \quad (3)$$

$$b = \frac{1 - 1/\sqrt{\mu_m}}{B_{sat}} \quad (4)$$

其中, N 为绕组匝数; S 为铁芯截面面积; L 为磁路平均长度; I_{elc} 为额外损耗电流的有效值; k_2 为常数,其值取决于电流互感器铁芯的电阻率、叠片厚度和宽度等材料参数; U_ϕ 为线圈中感应电压的有效值; P_d 为互感器中硅钢片铁芯的涡流损耗; N_2 为二次线圈匝数; d 为硅钢片厚度; c 为铁芯材料常数; ρ 为电阻率; μ_m 为最大相对磁导率; B_{sat} 为铁芯饱和磁感应强度。

图 7 给出了电流互感器接额定负载时变比 k (输出电流与输入电流之比)的频谱特性(未考虑二次电缆)。

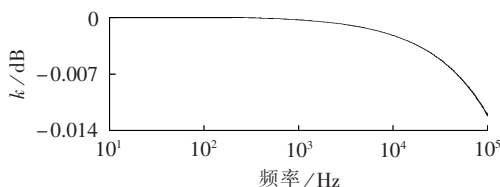


图 7 变比的频谱特性

Fig.7 Spectrum characteristic of k

从图 7 中可以看出,电流互感器变比的幅频特性呈现非线性;仅在工频附近电流互感器变比幅值为 0,即折算至一次侧后变比幅值为 1;当频率高于 500 Hz 时,变比幅值均小于 0,表明电流互感器会对该频率范围内的各次电流分量进行衰减。

2.2 二次信号电缆

二次信号电缆采用分布参数模型,由传输线理论可知:

$$\begin{bmatrix} U \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}(\gamma x) & Z_c \text{sh}(\gamma x) \\ \frac{1}{Z_c} \text{sh}(\gamma x) & \text{ch}(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $\text{ch}()$ 为双曲余弦函数; $\text{sh}()$ 为双曲正弦函数; U_2, I_2 分别为电缆终端电压、电流相量; U, I 分别为距终端距离 x 处的电压、电流相量; γ, Z_c 分别为传输线的传播常数、特性阻抗。

电缆末端相对首端电流幅值的衰减率为:

$$\alpha = (1 - |I_2/I_1|) \times 100\% = \left\{ 1 - \left[\operatorname{ch}(\gamma l) + \frac{Z_2}{Z_c} \operatorname{sh}(\gamma l) \right]^{-1} \right\} \times 100\% \quad (6)$$

其中, I_1 为电缆首端电流相量; Z_2 为电缆终端负载阻抗; l 为电缆长度。

以型号为 KVP22 的信号电缆为例, 取额定负载, 将参数 Z_2 、 Z_c 、 γ 、 l 代入式 (6), 计算得到各次谐波电流衰减率与电缆长度之间的关系如图 8 所示。

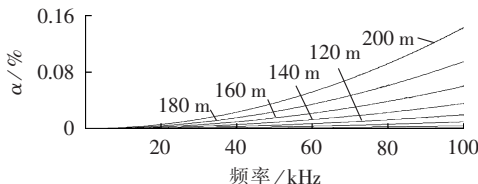


图 8 电缆长度对电流衰减率的影响

Fig.8 Influence of cable length on attenuation rate

由图 8 可知, 电缆长度在 0~200 m 范围内时, 电缆长度越长, 各次谐波电流幅值衰减得越严重。

将二次电缆及其终端负载整体接入电流互感器二次侧, 图 9 给出了不同负载率下电流互感器变比的频谱特性。

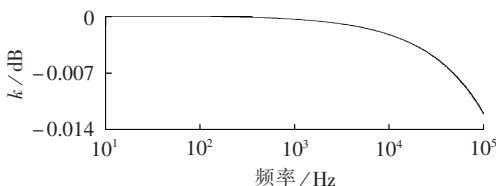


图 9 不同负载率下变比的频谱特性

Fig.9 Spectrum characteristics of k under different load rates

图 9 包含了负载率在 0~1.5 范围内等间距取值时的 10 条曲线, 可以看出这些曲线基本重合, 表明负载率对电流互感器变比频谱特性的影响很小。

图 10 给出不同电缆长度下电流互感器变比的频谱特性。

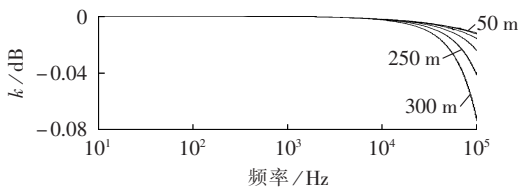


图 10 不同电缆长度下变比的频谱特性

Fig.10 Spectrum characteristics of k under different cable lengths

由图 10 可知, 电缆长度主要对频率高于 50 kHz 的电流互感器变比频谱特性产生影响, 从而对二次回路高频电流传导干扰特性产生影响。

3 换流站传导电磁干扰特性分析

3.1 一次回路

本文基于所建立的宽频等效电路, 进行了扎鲁

特—青州 ±800 kV 特高压直流输电工程在双极运行、单极大地返回、单极金属返回 3 种运行方式全压和降压 70% 下, 一次回路的传导电磁干扰特性的仿真计算。图 11 为双极全压运行时换流阀电流频谱特性。表 1 给出了不同运行方式下换流阀的传导电磁干扰水平。

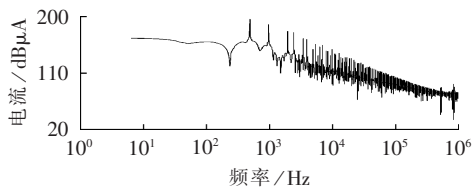


图 11 换流阀电流频谱特性

Fig.11 Current spectrum characteristic of converter valve

表 1 不同运行方式下的换流阀电磁干扰特性

Table 1 Electromagnetic interference of converter valve under different operation modes

频率/ kHz	传导电磁干扰水平/dBμA					
	双极 全压	双极 降压 70%	单极大地 返回全压	单极大地 返回降压 70%	单极金属 返回全压	单极金属 返回降压 70%
20	130.5	132.3	128.4	129.3	128.7	129.9
80	110.3	112.7	108.5	110.1	107.6	108.3
100	103.2	105.3	102.8	129.9	102.5	129.7
150	100.6	101.9	98.2	99.3	98.6	98.8
200	92.5	93.3	91.3	91.9	91.1	91.6
300	88.7	89.8	87.1	87.8	86.9	87.3
400	84.3	85.5	83.5	84.1	83.3	83.8
500	80.8	81.3	80.1	80.5	79.8	79.9

由图 11 可知, 总体而言, 换流阀的传导电磁干扰水平随着频率的增大而逐渐降低, 在 1 kHz~1 MHz 范围内衰减速率较大, 在 20 kHz~0.5 MHz 范围内, 传导电磁干扰水平由 130.5 dBμA 下降为 80.8 dBμA。

由表 1 可知, 双极运行、单极大地返回、单极金属返回 3 种运行方式下, 随着直流电压降低, 传导电磁干扰水平变大, 尤其是频率在 20 kHz 以上时变化更加明显。这主要是因为在 大触发角下运行时, 存在滤波器和换流变压器的谐波负荷和损耗较大, 换流阀承受的电压应力较大, 其阻尼回路的损耗增加等一系列运行性能恶化的问题, 引起交流侧和直流侧的谐波分量增加, 传导电磁干扰水平增大。因此在 进行换流站内设备抗扰度设计时, 应该考虑大触发角的情况。双极运行工况下的传导电磁干扰水平大于单极运行工况下的水平; 在低于 80 kHz 频率范围内, 单极金属返回方式下的传导电磁干扰水平大于单极大地返回方式下的水平; 而在 80~500 kHz 范围内单极大地返回方式下的传导电磁干扰水平大于单极金属返回方式下的水平。

3.2 二次回路

特高压直流换流站的二次设备包括站控、阀控、晶闸管触发、在线监测系统、直流监测系统、交流保

护、直流保护等主要设备。对于干扰途径而言,一方面,干扰通过电压互感器或电流互感器以传导的形式对二次设备产生干扰;另一方面,空间产生强瞬态电磁场,并通过电磁辐射耦合对保护和控制电缆终端产生干扰。

二次设备端口主要包括以下 2 个端口。

a. 外壳端口:设备的物理边界。电磁场通过这个边界可以向外辐射或进入设备。

b. 电缆端口:导线或电缆与设备相连接的端口,包括电源端口、信号端口和功能接地端口。电源端口是为设备供电或由设备向外供电的端口,包括电源输入与电源输出。信号端口是用于本地连接、现场连接以及连接至高压设备或通信设备的端口。功能接地端口不同于信号端口、控制端口和电源端口,其与接地系统连接,但不作为电气安全用的电缆端口。

基于所建立的特高压直流换流站一次回路、电流互感器和二次电缆的宽频等效电路,通过仿真得到双极全压运行时二次信号端口电流幅频特性如图 12 所示。图 13 给出了双极全压、双极降压 70%、单极大地返回全压、单极大地返回降压 70% 运行工况下二次信号端口处传导电磁干扰水平的对比。

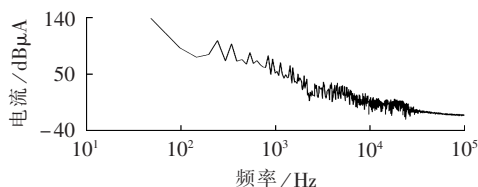


图 12 双极全压方式下二次信号端口处电流频谱特性

Fig.12 Current spectrum characteristic at secondary signal port under bipolar full voltage operation mode

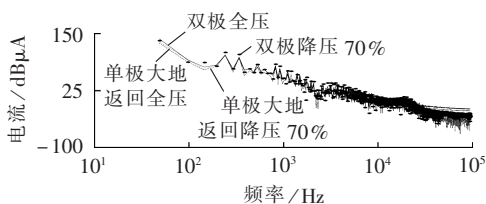


图 13 不同运行方式下二次信号端口处电流频谱特性

Fig.13 Current spectrum characteristic at secondary signal port under different operation modes

由图 12 可知,当扎鲁特—青州 ±800 kV 特高压直流换流站一次回路经电流互感器、二次电缆稳态传导电磁干扰至二次信号端口时,传导电磁干扰水平随频率的增大而减小。图 13 表明,双极运行工况下的二次信号端口处传导电磁干扰水平高于单极运行时的水平,降压运行时的传导电磁干扰水平高于全压运行时的水平。

由式(6)的计算推导分析可知,随着电缆长度的增加,二次信号端口处的传导电磁干扰水平基本不变。同时根据前文的分析可知,负载率对二次信号

端口处的传导电磁干扰水平基本没有影响。

4 结论

本文通过建立包含一二次设备在内的扎鲁特—青州特高压直流工程换流站整体宽频等效电路,进行了二次设备回路稳态传导电磁干扰特性的研究,分析了二次信号电缆长度、负载率等对二次设备回路传导电磁干扰的影响规律,得到的主要结论如下。

a. 一次设备回路传导电磁干扰特性分析表明:换流阀的传导电磁干扰水平在 20 kHz~0.5 MHz 范围内时由 130.5 dBμA 下降为 80.8 dBμA;大触发角运行时的传导电磁干扰水平较大,双极运行时的传导电磁干扰水平高于单极运行时的水平。

b. 二次设备回路中,随着电缆长度的增加,二次信号端口处的传导电磁干扰水平基本不变,且负载率对二次信号端口处的传导电磁干扰水平基本没有影响。

参考文献:

- [1] 赵腾,张焰,叶冠豪,等. 多回特高压直流分层馈入模式下交直流混联系统的稳态特性分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(8): 157-164.
ZHAO Teng,ZHANG Yan,YE Guanhao,et al. Steady-state characteristics analysis for AC-DC hybrid system in hierarchical-infeed mode of multi-loop UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(8):157-164.
- [2] 田书欣,程浩忠,常浩,等. 特高压电网社会效益分析及评价方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):145-153.
TIAN Shuxin,CHENG Haozhong,CHANG Hao,et al. Analysis and evaluation of social benefit from UHV power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):145-153.
- [3] 徐箭,张华坤,孙涛,等. 多馈入直流系统的特高压直流接入方式优选方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):58-63.
XU Jian,ZHANG Huakun,SUN Tao,et al. Optimal selection of UHVDC connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):58-63.
- [4] 赵志斌,崔翔,王琦. 换流站阀厅电磁骚扰强度的计算分析[J]. 高电压技术,2010,36(3):643-648.
ZHAO Zhibin,CUI Xiang,WANG Qi. Analysis of electromagnetic disturbance from valve hall in convert station[J]. High Voltage Engineering,2010,36(3):643-648.
- [5] 余占清,何金良,曾嵘,等. 高压换流站的主要电磁骚扰源特性[J]. 高电压技术,2008,34(5):898-902.
YU Zhanqing,HE Jinliang,ZENG Rong,et al. Characteristics of major EMD sources in HVDC converter stations[J]. High Voltage Engineering,2008,34(5):898-902.
- [6] 孙海峰,崔翔,齐磊,等. 高压直流换流阀过电压分布及其影响因素分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(22):120-126.
SUN Haifeng,CUI Xiang,QI Lei,et al. Overvoltage distribution in HVDC converter valves and analysis of influencing factors[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(22):120-126.
- [7] 王琦,刘磊,崔翔. HVDC 换流站二次系统暂态电磁骚扰的测量与计算[J]. 南方电网技术,2008,2(3):22-25.

- WANG Qi, LIU Lei, CUI Xiang. Measurement and calculation of the transient electro-magnetic disturbances of secondary system in HVDC converter station[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(3): 22-25.
- [8] 邓军, 肖遥, 楚金伟, 等. ± 800 kV 云广特高压直流线路合成电场仿真计算与测试分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 138-144.
- DENG Jun, XIAO Yao, CHU Jinwei, et al. Simulative calculation and measurement analysis of total electric field for ± 800 kV Yunnan-Guangzhou UHVDC transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 138-144.
- [9] 中国国家发改委. ± 800 kV 特高压直流换流站二次设备抗扰度要求: DLT 1087—2008[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [10] 余占清, 何金良, 张波, 等. 高压直流换流站中换流阀传导骚扰时域仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 17-23.
- YU Zhanqing, HE Jinliang, ZHANG Bo, et al. Time-domain simulation of conducted EMD caused by HVDC valves in substations[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 17-23.
- [11] 孙海峰, 崔翔, 齐磊, 等. 高压直流换流阀器件高频建模[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 142-148.
- SUN Haifeng, CUI Xiang, QI Lei, et al. High-frequency modeling of valve components in high voltage direct current converter stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 142-148.
- [12] 孙学海, 何金良. 变电所二次系统电磁兼容抗扰度指标分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2412-2416.

GONG Xuehai, HE Jinliang. Analysis on electromagnetic compatibility immunity indexes for secondary systems of substation [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2412-2416.

- [13] 林立鹏, 陈炳堂. 变电站二次设备抗干扰措施[J]. 广东电力, 2005, 18(1): 68-70.

LIN Lipeng, CHEN Bingtang. Anti-interference measures for secondary equipments in substations [J]. Guangdong Electric Power, 2005, 18(1): 68-70.

作者简介:



罗汉武

罗汉武(1975—), 男, 湖北黄石人, 高级工程师, 博士, 主要从事电力企业管理工作;

乐健(1975—), 男, 湖北黄冈人, 副教授, 博士, 通信作者, 主要从事智能电网运行与控制技术和特高压直流输电技术的研究 (E-mail: lej01@mails.tsinghua.edu.cn);

毛涛(1986—), 女, 湖北黄冈人, 助教, 硕士, 主要从事电能质量与特高压直流输电技术的研究;

李猛克(1971—), 男, 内蒙古通辽人, 高级工程师, 硕士, 主要从事输变电工程管理工作;

徐新尧(1985—), 男, 内蒙古通辽人, 助理工程师, 主要从事输变电工程管理工作;

崔士刚(1983—), 男, 内蒙古通辽人, 助理工程师, 从事电力科技管理工作。

Conducted electromagnetic interference of secondary equipment circuit in ± 800 kV UHVDC converter station

LUO Hanwu¹, LE Jian², MAO Tao³, LI Mengke¹, XU Xinyao¹, CUI Shigang¹

(1. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Maintenance Company, Tongliao 028000, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. School of Electrical and Mechanical Engineering, Wuhan Donghu University, Wuhan 430074, China)

Abstract: To provide a reference for the enforcement of EMI(ElectroMagnetic Interference) protection measures, the conducted EMI characteristics of the secondary equipment circuit in a ± 800 kV UHVDC converter station are analyzed. The broadband equivalent circuits of UHVDC converter stations including converter valve, converter transformer, smoothing reactor and filter are built. The conducted EMI characteristics of main circuit under several operation modes are also analyzed. Combined with the broadband equivalent circuits of current transformer and secondary cables, the conducted EMI characteristics of the secondary circuit under different operation modes are illustrated, and the impacts of cable length and load rate on the conducted EMI characteristics are analyzed.

Key words: UHVDC power transmission; converter station; current transformers; broadband equivalent circuit; secondary equipment circuit; conducted electromagnetic interference