

含滤波器的多换流站谐波阻抗模型与谐波交互影响研究

郭春林¹,徐 轩²,张琛亮¹,杨 琳¹,马 凯¹,蒋维勇³

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206;

2. 国网浙江省电力有限公司 衢州供电公司,浙江 衢州 324000;3. 国网北京经济技术研究院,北京 102209)

摘要:当多个换流站位于相邻交流电网时,换流站之间电气距离较小,一些特定的交流滤波器组合投切方式可能会引发换流站之间谐波电流的交互影响。基于谐波阻抗方法定义了换流站谐波电流影响系数,用于计算换流站之间谐波电流的交互影响程度。以银川东站与灵州站构成的多换流站系统为例,搭建含有交流滤波器的谐波阻抗模型,针对特征谐波,计算谐波电流影响系数,分析了交流滤波器组合投切对银川东站、灵州站谐波电流交互作用的影响。结果显示11、13次谐波电流的交互影响较小,23、25次谐波电流的交互影响较大,且特定滤波器的投切会造成各换流站交流母线谐波电流的明显变化。最后,建立PSCAD电磁暂态仿真模型,对上述分析结果进行了验证。

关键词:多换流站系统;谐波交互影响;滤波器投切;谐波阻抗;特征谐波;谐波分析

中图分类号:TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008036

0 引言

高压直流输电由于具备大容量、低损耗、非同步能力强等优势,在长距离大容量输电方面得到了广泛应用^[1]。当多条直流输电线路的换流站落于电气距离较近的交流电网时,由于多个换流站落点相对集中,相互间电气耦合紧密^[2],在一些特定的运行方式下,一个换流站产生的谐波电流不仅会对本站产生影响还有可能通过交流线路影响系统中的其他换流站,尤其是系统中的滤波设备,此时换流站之间存在着谐波的交互影响^[3-5]。目前直流输电的谐波问题主要针对单一谐波源的情况^[6],且滤波器作为影响谐波交互的原因之一,针对其参数设计、运行方式对谐波交互影响的研究仍然不足,因此需要建立相应的谐波分析模型,对含交流滤波器的多换流站谐波交互影响现象进行研究。

交流滤波器投切是产生谐波交互影响的重要原因之一,文献[7]通过对南方电网多馈入直流系统多个逆变站滤波器投切进行混合时域仿真,指出交流滤波器的组合投切可能会引发谐波电流的交互影响,造成投切效果与预期不同、甚至相反,但仅给出了仿真现象,未对滤波器投切对谐波影响的内在机理进行解释。为了描述换流站之间谐波交互影响的现象,文献[8]基于频率扫描技术,研究了谐波电压在交流系统中的传递规律,将多馈入交互作用因子(MIIF)^[9]概念从基频扩展到谐波频率,用以衡量一

个换流站谐波对相邻换流站的影响程度。文献[10]给出了多馈入直流输电系统中交流侧谐波吸收、谐波放大的定义,并着重分析了换流站谐波电流对远端换流站的影响方式,但未对交流滤波器投切方式对谐波交互影响的作用进行深入研究。

本文首先定义了换流站谐波电流影响系数,用于描述相邻换流站之间谐波电流交互影响程度的大小;然后建立银川东、灵州多换流站谐波阻抗模型,针对特征谐波,计算谐波电流影响系数,研究交流滤波器组合投切运行对换流站谐波电流交互的影响;最后在PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件中建立仿真模型,对分析结果进行验证。

1 换流站谐波电流影响系数

在多换流站系统中,交流滤波器的设计及运行方式应该保证交流滤波器能够就地吸收本换流站产生的各次谐波电流,且一个换流站滤波器的投切动作,不应应对相邻站的谐波状况产生较大的影响。

本文以2个换流站组成的系统为例,建立多换流站谐波分析模型,如图1所示。图中, $I_{1(h)}$ 、 $I_{2(h)}$ 分别为换流站1、2流入交流系统的 h 次谐波电流; $I_{c1(h)}$ 、 $I_{c2(h)}$ 分别为换流器1、2作为谐波源产生的 h 次谐波电流; $Z_{f1(h)}$ 、 $Z_{f2(h)}$ 分别为换流站1、2的交流滤波

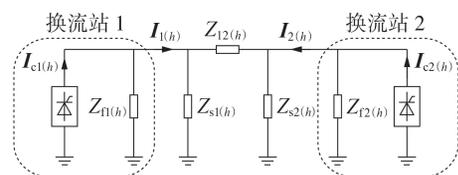


图1 多换流站谐波分析模型

Fig.1 Harmonic analysis model of multiple converter station system

收稿日期:2020-02-13;修回日期:2020-07-03

基金项目:工业和信息化部绿色制造系统集成项目资助(MIIT2016755)

Project supported by the Ministry of Industry and Information Technology Green Manufacturing System Integration Project (MIIT2016755)

器等值谐波阻抗; $Z_{s1(h)}$ 、 $Z_{s2(h)}$ 分别为换流站1、2所处交流系统的等值谐波阻抗; $Z_{12(h)}$ 为换流站1、2间交流联络阻抗。

由于交流系统的背景谐波通常远小于换流站产生的谐波,所以本文忽略交流系统的背景谐波,将换流器视为谐波电流源,换流站交流母线上的谐波电流可以由各换流器产生的谐波电流线性表示为:

$$\begin{bmatrix} I_{1(h)} \\ I_{2(h)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{11(h)} & \beta_{12(h)} \\ \beta_{21(h)} & \beta_{22(h)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1(h)} \\ I_{c2(h)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

定义 β 为换流站谐波电流影响系数,式(1)中的 $\beta_{11(h)}$ 、 $\beta_{22(h)}$ 表示换流站交流母线谐波电流与本站换流器谐波电流的关系, $\beta_{12(h)}$ 、 $\beta_{21(h)}$ 表示换流站交流母线谐波电流与相邻站换流器谐波电流的关系,具体表达式如下:

$$\beta_{11(h)} = 1 - \frac{Z_{1(h)}Z_{2(h)} + Z_{1(h)}Z_{12(h)}}{Z_{f1(h)}(Z_{1(h)} + Z_{2(h)} + Z_{12(h)})} \quad (2)$$

$$\beta_{12(h)} = \frac{-Z_{1(h)}Z_{2(h)}}{Z_{f1(h)}(Z_{1(h)} + Z_{2(h)} + Z_{12(h)})} \quad (3)$$

$$\beta_{21(h)} = \frac{-Z_{1(h)}Z_{2(h)}}{Z_{f2(h)}(Z_{1(h)} + Z_{2(h)} + Z_{12(h)})} \quad (4)$$

$$\beta_{22(h)} = 1 - \frac{Z_{1(h)}Z_{2(h)} + Z_{2(h)}Z_{12(h)}}{Z_{f2(h)}(Z_{1(h)} + Z_{2(h)} + Z_{12(h)})} \quad (5)$$

$$Z_{1(h)} = \frac{Z_{f1(h)}Z_{s1(h)}}{Z_{f1(h)} + Z_{s1(h)}} \quad (6)$$

$$Z_{2(h)} = \frac{Z_{f2(h)}Z_{s2(h)}}{Z_{f2(h)} + Z_{s2(h)}} \quad (7)$$

谐波电流影响系数与交流网络及交流滤波器的阻抗参数相关,直接反映了各换流站谐波电流的交互影响情况。 $\beta_{11(h)}$ 、 $\beta_{22(h)}$ 的数值越大说明本站滤波器的滤波能力不足,更多的谐波电流无法被本站滤波器吸收从而流入交流电网; $\beta_{12(h)}$ 、 $\beta_{21(h)}$ 的数值越大说明换流站的谐波电流受相邻站的影响越大。

2 宁夏多换流站谐波阻抗模型

灵州—绍兴 ± 800 kV 直流输电工程(简称宁浙直流)与宁东—山东 ± 660 kV 直流输电工程(简称宁东直流)均为大规模外送宁夏火电的直流输电工程。其中宁东直流的银川东换流站与750 kV 变电站同址建设,并通过长60 km 的双回750 kV 交流线路与宁浙直流的灵州换流站相连,系统接线图如图2所示。本文以宁夏多换流站系统为例,建立含滤波器的多换流站谐波阻抗模型。

2.1 交流系统谐波阻抗模型

本文重点研究换流站谐波的交互影响,考虑到谐波通过电气距离最短的线路进行传递,保留换流站之间的联络变压器及交流联络线路,将复杂交流

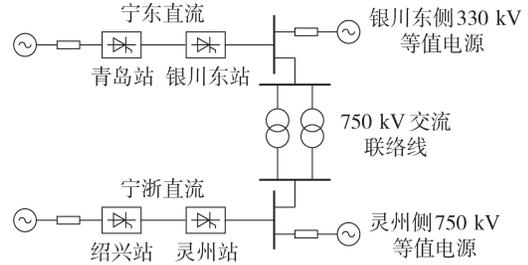


图2 宁夏多换流站系统接线图
Fig.2 Wiring diagram of Ningxia multiple converter station system

电网用戴维南等效电路替代。

2.2 变压器谐波阻抗模型

变压器正常运行时铁芯一般不饱和,且谐波含量不高时,谐波铁损耗远小于谐波铜损耗^[11],励磁支路影响较小,本文采用绕线电阻与漏抗串联的变压器模型^[12]。 h 次谐波频率下的变压器串联谐波阻抗 $Z_{T(h)}$ 可表示为^[13]:

$$Z_{T(h)} = \sqrt{h} R_T + jhX_T \quad (8)$$

其中, R_T 、 X_T 分别为工频状态下变压器的串联电阻与串联电抗。

2.3 输电线路谐波阻抗模型

基于输电线路的分布参数特性,利用二阶线性微分方程,即可求解出 π 型等值模型,见图3。图中, $Z_{Line(h)}$ 、 $Y_{Line(h)}$ 分别为输电线路 π 型等值模型的串联谐波阻抗和并联谐波导纳。当线路长度较短时,该模型可较精确地描述交流输电线路的谐波阻抗特性。

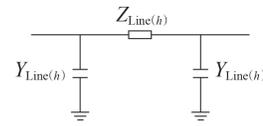


图3 输电线路 π 型模型

Fig.3 π -type model of transmission line

假设输电线路长度为 L ,基频下的串联阻抗为 $R+jX$,并联导纳为 jB 。由此计算交流输电线路 π 型模型的谐波阻抗参数如下^[14]:

$$Z_{Line(h)} = Z_s \sin(h\gamma L) \quad (9)$$

$$Y_{Line(h)} = \frac{1}{Z_s} \tan\left(h \frac{\gamma L}{2}\right) \quad (10)$$

其中, Z_s 、 γ 分别为输电线路的特征阻抗与传播常数。

$$Z_s = \sqrt{\frac{R+jhX}{jhB}} \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{(R+jhX)jhB}}{L} \quad (12)$$

2.4 系统谐波阻抗分析模型

基于各元件的谐波阻抗模型,搭建宁夏多换流站系统的谐波阻抗模型,如图4所示。图中, $I_{cy(h)}$ 、 $I_{cl(h)}$ 分别为银川东站、灵州站产生的 h 次谐波电流;

$I_{y(h)}$ 、 $I_{l(h)}$ 分别为银川东站、灵州站交流母线上的 h 次谐波电流; $Z_{fy(h)}$ 、 $Z_{fl(h)}$ 分别为银川东站、灵州站的交流滤波器谐波阻抗; $Z_{sy(h)}$ 、 $Z_{sl(h)}$ 分别为银川东站、灵州站所处交流系统的等值谐波阻抗; $Z_{T(h)}$ 为联络变压器等值串联谐波阻抗; $Z_{line(h)}$ 、 $Y_{line(h)}$ 分别为交流联络线 π 型等值电路的串联谐波阻抗与并联谐波导纳。

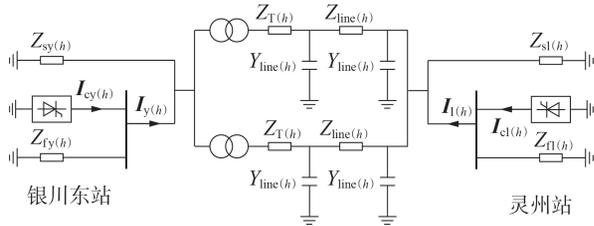


图 4 宁夏多换流站系统谐波分析模型

Fig.4 Harmonic analysis model of Ningxia multiple converter station system

3 多换流站谐波电流交互影响分析

3.1 换流站谐波电流影响系数

用换流站谐波电流影响系数 β 表示银川东站与灵州站交流母线上的谐波电流 $I_{y(h)}$ 、 $I_{l(h)}$ 与换流器产生的谐波电流 $I_{cy(h)}$ 、 $I_{cl(h)}$ 之间的关系,可得:

$$\begin{bmatrix} I_{y(h)} \\ I_{l(h)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{yy(h)} & \beta_{yl(h)} \\ \beta_{ly(h)} & \beta_{ll(h)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{cy(h)} \\ I_{cl(h)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, $\beta_{yy(h)}$ 、 $\beta_{ll(h)}$ 分别表示银川东站、灵州站交流母线谐波电流与本站换流器谐波电流的关系; $\beta_{yl(h)}$ 表示银川东站交流母线谐波电流与灵州站换流器谐波电流的关系; $\beta_{ly(h)}$ 表示灵州站交流母线谐波电流与银川东站换流器谐波电流的关系。

$$\beta_{yy(h)} = 1 - \frac{Z_{Y(h)}Z_{L(h)} + Z_{Y(h)}Z_{YL(h)}}{Z_{fy(h)}(Z_{Y(h)} + Z_{L(h)} + Z_{YL(h)})} \quad (14)$$

$$\beta_{yl(h)} = \frac{-Z_{Y(h)}Z_{L(h)}}{Z_{fy(h)}(Z_{Y(h)} + Z_{L(h)} + Z_{YL(h)})} \quad (15)$$

$$\beta_{ly(h)} = \frac{-Z_{Y(h)}Z_{L(h)}}{Z_{fl(h)}(Z_{Y(h)} + Z_{L(h)} + Z_{YL(h)})} \quad (16)$$

$$\beta_{ll(h)} = 1 - \frac{Z_{Y(h)}Z_{L(h)} + Z_{L(h)}Z_{YL(h)}}{Z_{fl(h)}(Z_{Y(h)} + Z_{L(h)} + Z_{YL(h)})} \quad (17)$$

$$Z_{Y(h)} = \frac{Z_{fy(h)}Z_{sy(h)}Z_{13(h)}}{Z_{sy(h)}Z_{13(h)} + Z_{fy(h)}Z_{13(h)} + 2Z_{fy(h)}Z_{sy(h)}} \quad (18)$$

$$Z_{13(h)} = \frac{Z_{T(h)}}{Z_{line(h)}Y_{line(h)}} + \frac{1}{Y_{line(h)}} + Z_{T(h)} \quad (19)$$

$$Z_{L(h)} = Z_{fl(h)}Z_{sl(h)}Z_{23(h)} / (Z_{sl(h)}Z_{23(h)} + Z_{fl(h)}Z_{23(h)} + 2Z_{fl(h)}Z_{sl(h)} + 2Y_{line(h)}Z_{fl(h)}Z_{sl(h)}Z_{23(h)}) \quad (20)$$

$$Z_{23(h)} = \frac{Z_{line(h)}}{Z_{T(h)}Y_{line(h)}} + \frac{1}{Y_{line(h)}} + Z_{line(h)} \quad (21)$$

$$Z_{YL(h)} = \frac{Z_{T(h)} + Z_{line(h)} + Z_{T(h)}Z_{line(h)}Y_{line(h)}}{2} \quad (22)$$

3.2 换流站交流滤波器投切方式

银川东站与灵州站均配备了多组交流滤波及无功补偿装置,对系统进行无功补偿的同时吸收交流侧的谐波电流^[15]。

银川东站设有 14 组交流滤波及无功补偿装置,每组容量 150 Mvar,分别为 3 组 11 / 13 次双调谐高通滤波器(HP11 / 13)、3 组 24 / 36 次双调谐高通滤波器(HP24 / 36)、1 组 3 次高通滤波器(HP3)和 7 组并联电容器(SC)。

灵州站设有 16 组交流滤波及无功补偿装置,每组容量 295 Mvar,分别为 4 组 11 / 13 次双调谐带通滤波器(BP11 / 13)、4 组 HP24 / 36、3 组 HP3 和 5 组 SC。

根据系统不同运行方式下无功补偿的需要,换流站会投入不同组数的交流滤波设备^[16]。同时按照最小滤波器配置要求及循环投入原则,交流滤波器组具有特定的投切顺序。表 1 按投入组数的不同给出了银川东站、灵州站交流滤波器的运行投入方案。由表 1 可见,银川东站交流滤波器共有 13 种运行方式,灵州站交流滤波器共有 15 种运行方式。考虑 2 个换流站交流滤波器运行方式的组合,共有 195 种可能的滤波器组合投切方式。

表 1 银川东站、灵州站交流滤波器运行投入方案

Table 1 Operation schemes of AC filters in Yinchuandong Station and Lingzhou Station

滤波器投入总组数	银川东站投入滤波器组数				灵州站投入滤波器组数			
	HP11/13	HP24/36	HP3	SC	BP11/13	HP24/36	HP3	SC
2	1	1	0	0	1	1	0	0
3	2	1	0	0	1	1	1	0
4	2	2	0	0	2	1	1	0
5	2	2	1	0	2	2	1	0
6	3	2	1	0	2	2	2	0
7	3	3	1	0	3	2	2	0
8	3	3	1	1	3	3	2	0
9	3	3	1	2	3	3	3	0
10	3	3	1	3	4	3	3	0
11	3	3	1	4	4	4	3	0
12	3	3	1	5	4	4	3	1
13	3	3	1	6	4	4	3	2
14	3	3	1	7	4	4	3	3
15	—	—	—	—	4	4	3	4
16	—	—	—	—	4	4	3	5

考虑交流滤波器的参数配置及运行投入方案,以 11、13、23、25 次特征谐波为例,银川东站与灵州站在不同组合投切方式下,交流滤波器的谐波阻抗幅值特性如图 5 所示,图中阻抗幅值为标么值。

3.3 换流站谐波电流影响系数计算结果

由于直流输电普遍采用 12 脉动换流器,交流侧会产生 $12k \pm 1$ 次的特征谐波电流^[17],本文以 11、13、23、25 次特征谐波为例,计算交流滤波器不同组合投切方式下的换流站谐波电流影响系数,并分析计算结果。

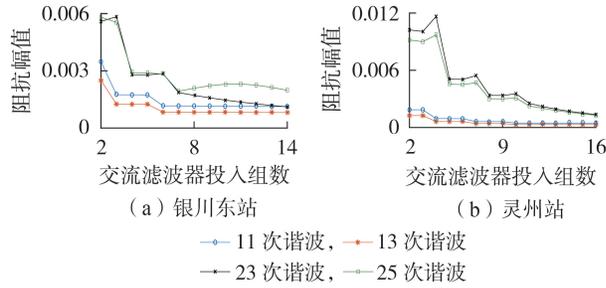


图5 不同组合投切方式下交流滤波器谐波阻抗幅值
Fig.5 Harmonic impedance amplitude of AC filters under different combination switching schemes

3.3.1 11次谐波

计算交流滤波器不同组合投切方式下的换流站11次谐波电流影响系数 β_{yy} 、 β_{yl} 、 β_{ly} 、 β_{ll} ,其幅值如图6

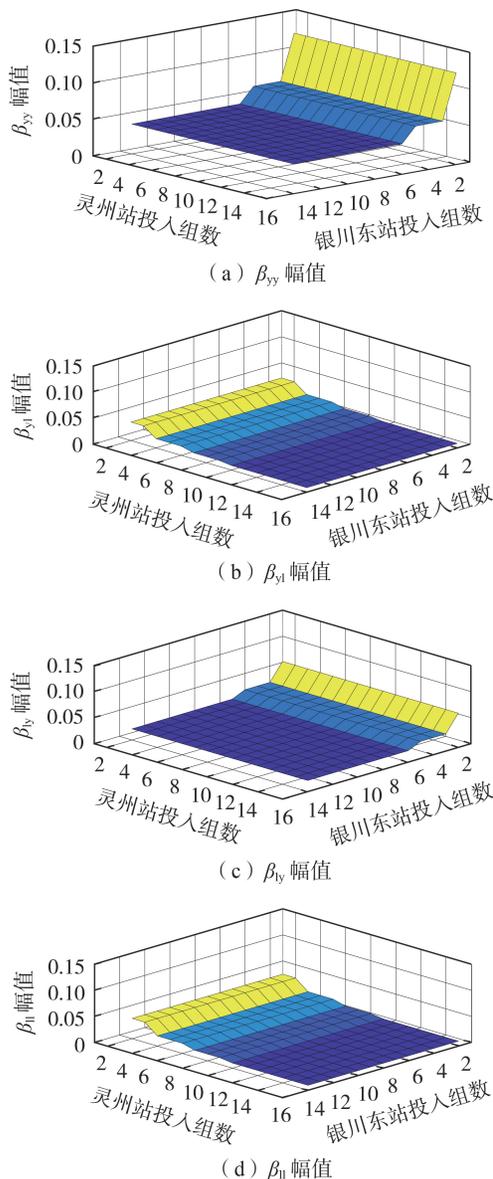


图6 交流滤波器不同组合投切方式下11次谐波电流影响系数

Fig.6 Influence coefficients of 11th harmonic current under different combination switching schemes of AC filter

所示。可以看出,在交流滤波器组合投切方式下11次谐波电流影响系数幅值总体较小,银川东站、灵州站交流滤波器以吸收本站产生的11次谐波为主;2个换流站之间11次谐波电流的交互影响作用不明显。

3.3.2 13次谐波

计算交流滤波器不同组合投切方式下的换流站13次谐波电流影响系数 β_{yy} 、 β_{yl} 、 β_{ly} 、 β_{ll} ,其幅值如附录中图A1所示。可以看出,在交流滤波器不同组合投切方式下,谐波电流影响系数的幅值总体较小,银川东站、灵州站交流滤波器以吸收本站产生的13次谐波为主;2个换流站之间谐波电流的交互影响作用不明显。

3.3.3 23次谐波

计算滤波器不同组合投切方式下的换流站23次谐波电流影响系数 β_{yy} 、 β_{yl} 、 β_{ly} 、 β_{ll} ,其幅值如附录中图A2所示。分析可知:

(1)银川东站交流滤波器在不同组合投切方式下均能较好地吸收本站产生的23次特征谐波电流;

(2)灵州站投入的交流滤波器越少则对银川东站的影响越大,特别是投切第4组滤波器(第2组HP24/36)前后, β_{yl} 幅值变化明显,换流站谐波交互影响显著;

(3)当灵州站投入较多交流滤波器时,银川东站投入的交流滤波器越少则对灵州站的影响越大,特别是投切第4组滤波器(第2组HP24/36)前后, β_{ly} 的幅值变化明显,换流站谐波交互影响显著;

(4)灵州站投入较少交流滤波器时,吸收本站产生的23次特征谐波的能力明显不足,且投切第4组滤波器(第2组HP24/36)前后, β_{ll} 幅值变化较大,对本站交流母线上的谐波电流影响明显。

3.3.4 25次谐波

计算交流滤波器不同组合投切方式下的换流站25次谐波电流影响系数 β_{yy} 、 β_{yl} 、 β_{ly} 、 β_{ll} ,其幅值如附录中图A3所示。分析可知25次谐波电流影响系数与23次谐波电流影响系数具有相似的性质。

4 仿真实验

建立如图2所示的宁夏多换流站系统的PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真模型,由第3节可知,相比于11、13次特征谐波,交流滤波器组合投切方式对换流站23、25次谐波电流交互作用影响更大。重点研究交流滤波器组合投切方式对换流站交流母线23、25次谐波电流的影响。

4.1 运行方式1

宁浙直流以额定功率运行,灵州站共投入13组交流滤波设备;宁东直流以25%额定功率运行,银川东站共投入3组交流滤波设备。3s时系统达到稳定状态,3.5s时在银川东站投入1组HP24/36,5s

时结束仿真。当系统处于稳态运行时,分别测量银川东站、灵州站注入系统的 23、25 次谐波电流 (I_{cy} 、 I_{cl} 均为标幺值,后同),如表 2 所示。

表 2 换流站交流侧谐波电流

Table 2 AC-side harmonic current of converter station

谐波次数	I_{cy}	I_{cl}
23	0.2833∠-2.6463°	0.4827∠1.2553°
25	0.2387∠2.7756°	0.3465∠-0.2686°

交流滤波器投切前后,测量灵州站交流母线上 23、25 次谐波电流波形如图 7 所示。图中,电流幅值为标幺值,后同。将仿真结果与谐波电流影响系数计算得到的谐波电流进行比较,结果如表 3 所示。

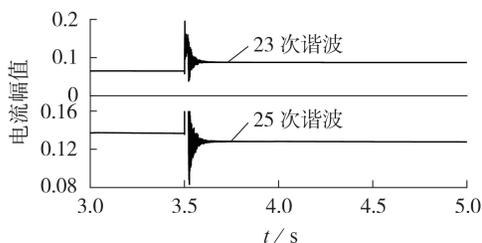


图 7 灵州站交流母线上谐波电流波形

Fig.7 Waveforms of harmonic current of AC bus in Lingzhou Station

表 3 灵州站交流母线上谐波电流的仿真结果和计算结果对比

Table 3 Comparison of simulative and calculated results of harmonic current of AC bus in Lingzhou Station

谐波次数	电流幅值(投入前)		电流幅值(投入后)	
	仿真结果	计算结果	仿真结果	计算结果
23	0.0649	0.0655	0.0872	0.0882
25	0.1367	0.1372	0.1278	0.1303

由图 7 与表 3 结果可知,基于谐波电流影响系数计算的结果与仿真结果相吻合,误差小于 2%,说明基于多换流站谐波阻抗模型的谐波电流影响系数能够对谐波交互影响现象进行较为准确的数学描述。

银川东站投入 1 组 HP24 / 36,灵州站交流母线上 23 次谐波电流增加了约 35%,25 次谐波电流减少了 6%。银川东站交流滤波器的投切影响了相邻的灵州站交流母线上谐波电流,这与 3.3.3 节中的分析结论(3)一致。

4.2 运行方式 2

宁浙直流以 30% 额定功率运行,灵州站共投入 4 组交流滤波设备;宁东直流以额定功率运行,银川东站共投入 14 组交流滤波设备。3 s 时系统已达到稳定状态,3.5 s 时在银川东站投入 1 组 HP24 / 36,5 s 时结束仿真。当系统处于稳态运行时,分别测量银川东站、灵州站注入系统的 23、25 次谐波电流 I_{cy} 、 I_{cl} ,如表 4 所示。

表 4 换流站交流侧谐波电流

Table 4 AC-side harmonic current of converter station

谐波次数	I_{cy}	I_{cl}
23	0.3929∠-2.8832°	0.3000∠3.0599°
25	0.3216∠2.1765°	0.2796∠2.1983°

交流滤波器投切前后,测量灵州站交流母线上 23、25 次谐波电流,仿真波形如附录中图 A4 所示。将仿真结果与谐波电流影响系数计算得到的谐波电流进行比较,结果如附录中表 A1 所示。由结果可知,基于谐波电流影响系数计算的结果与仿真结果相吻合,误差小于 2%。

由于灵州站滤波器投入组数较少时,吸收的谐波电流较少,大部分谐波电流经交流母线流入交流系统,因此交流母线上 23、25 次谐波电流值较大;灵州站投入 1 组 HP24 / 36,吸收了更多的谐波电流,灵州站交流母线上 23 次谐波电流减少了约 34%,25 次谐波电流减少了约 18%。这与 3.3.3 节中的分析结论(4)一致。

交流滤波器投切前后,测量银川东站交流母线上 23、25 次谐波电流,仿真波形如图 8 所示。将仿真结果与谐波电流影响系数计算得到的谐波电流进行比较,结果如表 5 所示。

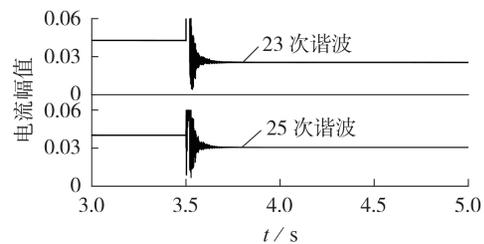


图 8 银川东站交流母线上谐波电流波形

Fig.8 Waveforms of harmonic current of AC bus in Yinchuandong Station

表 5 银川东站交流母线上谐波电流的仿真结果和计算结果对比

Table 5 Comparison of simulative and calculated results of harmonic current of AC bus in Yinchuandong Station

谐波次数	电流幅值(投入前)		电流幅值(投入后)	
	仿真结果	计算结果	仿真结果	计算结果
23	0.0428	0.0426	0.0255	0.0249
25	0.0401	0.0405	0.0306	0.0300

由图 8 与表 5 可知,基于谐波电流影响系数计算的结果与仿真结果相吻合,误差小于 3%。

灵州站投入 1 组 HP24 / 36,银川东站交流母线上 23 次谐波电流减少了约 40%,25 次谐波电流减少了约 24%。这是由于银川东站交流母线上谐波电流受灵州站影响较大,灵州站交流滤波器的投切对相邻的灵州站交流母线上谐波电流产生显著的影响,这与 3.3.3 节中的分析结论(2)一致。

5 结论

本文定义了换流站谐波电流影响系数,用以描述相邻换流站之间谐波电流交互影响程度的大小。以宁夏多换流站系统为例,建立各元件的谐波阻抗模型,研究了交流滤波器组合投切方式对银川东站与灵州站谐波电流交互作用的影响,搭建电磁暂态仿真模型对分析结果进行验证。

银川东站与灵州站之间的交流滤波器投切对特征谐波电流交互作用影响的结论如下。

(1)银川东站与灵州站之间11、13次特征谐波的交互影响现象不明显。

(2)针对23、25次特征谐波,当灵州站投入交流滤波器的组数较少时,会有较多的谐波电流无法被滤波器吸收,从而流入交流电网,并对相邻的银川东站产生较大影响;当银川东站投入交流滤波器的组数较少且灵州站投入交流滤波器的组数较多时,银川东站谐波电流对灵州站的谐波电流影响较大。

(3)在灵州站投入交流滤波器的组数较少的情况下,灵州站投切HP24/36会对本站及银川东站交流母线上23、25次谐波电流产生较大的影响。

(4)当灵州站投入交流滤波器的组数较多且银川东站投切第2组HP24/36时,灵州站交流母线上23、25次谐波电流值受到较大影响。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 浙江大学发电教研组直流输电科研组. 直流输电[M]. 北京: 电力工业出版社, 1985: 30-47.
- [2] 邵瑶, 汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 24-30.
SHAO Yao, TANG Yong. Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 24-30.
- [3] HU L, YACAMINI R. Calculation of harmonics and interharmonics in HVDC schemes with low DC side impedance[J]. IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 140(6): 469-476.
- [4] 赵曦君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 13-41.
- [5] 余涛, 史军, 任震. 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): 118-123.
YU Tao, SHI Jun, REN Zhen. Interharmonic in AC/DC hybrid transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 118-123.
- [6] 李战鹰, 任震, 曾坚勇. 多馈入直流输电系统交流侧滤波方案的设计[J]. 电网技术, 2005, 29(7): 27-30.
LI Zhanyong, REN Zhen, ZENG Jianyong. Design of filtering scheme at AC side of multi-infeed DC power transmission system[J]. Power System Technology, 2005, 29(7): 27-30.
- [7] 郝巍, 李兴源, 金小明, 等. 多馈入直流系统中逆变器滤波器投切对谐波电流的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 48-52.
HAO Wei, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. Impacts of swit-

ching AC filters of inverter stations on harmonic currents in multi-infeed HVDC system[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 48-52.

- [8] DENBOER N, KARAWITA C, MOHADDES M. Frequency scan based screening technique for harmonic interactions of HVDC systems[C]//13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017). Manchester, UK: IET, 2017: 35-36.
- [9] CIGRE Working Group B4.41. Systems with multiple DC infeed [R]. Paris, France: CIGRE, 2008.
- [10] 杨光亮, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 多馈入直流输电系统谐波交互影响分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 105-110.
YANG Guangliang, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Harmonic interaction analysis for multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 105-110.
- [11] 刘书铭, 施红, 冯蕾. 考虑集肤效应与邻近效应的变压器谐波损耗模型[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 133-139.
LIU Shuming, SHI Hong, FENG Lei. Harmonic loss model of transformer considering skin effect and proximity effect[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 133-139.
- [12] DENSEM T J, BODGER P S, ARRILLAGA J. Three phase transmission system modelling for harmonic penetration studies [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1984, PAS-103(2): 310-317.
- [13] ARRILLAGA J, WATSON N R. Power system harmonics[M]. 2nd ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc, 2004: 65-76.
- [14] 徐政, 段慧. 全频段交流系统等值与谐波计算程序的研发[J]. 高压技术, 2008, 34(6): 1131-1137.
XU Zheng, DUAN Hui. Program for AC system wide frequency range equivalence and harmonic calculation[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 1131-1137.
- [15] 李双健, 贾秀芳, 季一鸣, 等. 基于MMC拓扑的混合型滤波器设计及其在LCC-HVDC中的应用[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 115-121.
LI Shuangjian, JIA Xiufang, JI Yiming, et al. Design of hybrid filter based on MMC topology and its application in LCC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 115-121.
- [16] 袁志昌, 魏应冬, 刘文华, 等. 柔性互联交流配电网的换流器并离网统一控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 1-7.
YUAN Zhichang, WEI Yingdong, LIU Wenhua, et al. Connecting and islanding universal control strategy for VSC of AC distribution grids[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 1-7.
- [17] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 16-36.

作者简介:



郭春林

郭春林(1975—),男,湖南涟源人,教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定、电动汽车充电设施及影响(E-mail: gcl@ncepu.edu.cn);

徐 轩(1993—),男,浙江衢州人,硕士,主要研究方向为高压直流输电、电能质量分析与控制(E-mail: xu_xuan@yeah.net);

张琛亮(1996—),男,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电、电能质量分析与控制(E-mail: zcl@ncepu.edu.cn)。

(编辑 李莉)

Research on harmonic impedance model and harmonic interaction of multiple converter station system with AC filters

GUO Chunlin¹, XU Xuan², ZHANG Chenliang¹, YANG Lin¹, MA Kai¹, JIANG Weiyong³

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Quzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Quzhou 324000, China;

3. State Grid Economic and Technological Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: When multiple converter stations are located in the adjacent AC networks, the electrical distance between the converter stations is short, and some specific AC filter combination switching methods may cause the harmonic current interaction between converter stations. Based on the harmonic impedance method, the influence coefficient of harmonic current in converter stations is defined, which is used to calculate the interactive influence degree of harmonic current between converter stations. Taking the multiple converter station system composed of Yinchuandong Station and Lingzhou Station as an example, the harmonic impedance model with AC filter is established to calculate the harmonic current influence coefficient of characteristic harmonics, and the influence of AC filter combination switching on the harmonic current interaction between Yinchuandong Station and Lingzhou Station is analyzed. The result shows that the interaction of 11th and 13th harmonic currents is small while the interaction of 23rd and 25th harmonic currents is relatively large, and the switching of specific filters will cause significant changes in harmonic current of AC bus in each converter station. Finally, the PSCAD electromagnetic transient simulation model is built to verify the analysis results.

Key words: multiple converter stations; interaction of harmonic current; switching filters; harmonic impedance; characteristic harmonics; harmonic analysis

(上接第 180 页 continued from page 180)

Ordered charging of EVs considering time-varying electricity price and transition probability under “dedicated transformer sharing” mode

YANG Jingxu¹, ZHOU Lai¹, ZHANG Yongjun¹, HUANG Chunyan², FAN Suchun¹

(1. Research Center of Smart Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Power Electrical Technology Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: In order to solve the problem that it is difficult to build new transformers to supply power in the parking lot of urban buildings, the “dedicated transformer sharing” mode is proposed, which utilizes the redundant capacity of original dedicated transformers to absorb the EV (Electric Vehicle) load. A three-layer ordered charging adjustment model dominated respectively by dedicated transformer users, charging station operators and EV users is established. The comprehensive objective of ordered charging is set up by establishing the assessment indexes, such as charging experience index, capacity rent charge of dedicated transformer, charging station operators’ profit, utilization index of dedicated transformer, and so on, which can describe the needs of all parties. An ordered charging optimization model considering time-varying electricity price and the transition probability of EV users’ charging period is built, and an ordered charging optimization method based on the particle swarm optimization algorithm is proposed. The optimization effect of the three-layer ordered charging adjustment model based on time-varying electricity price is analyzed by simulation. The rationality of considering EV travel demand and electricity constraint is verified, and the influence of the types of building load on ordered charging is studied.

Key words: electric vehicles; dedicated transformer sharing; ordered charging; transition probability; time-varying electricity price; particle swarm optimization algorithm; models

附录

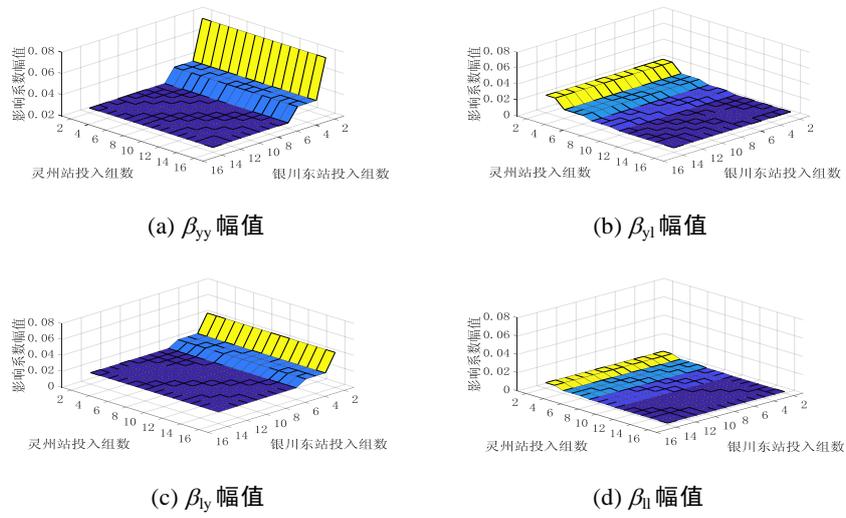


图 A1 交流滤波器不同组合投切方式下的 13 次谐波电流影响系数

Fig.A1 Influence coefficients of 13th harmonic current under different combination switch schemes of AC filter

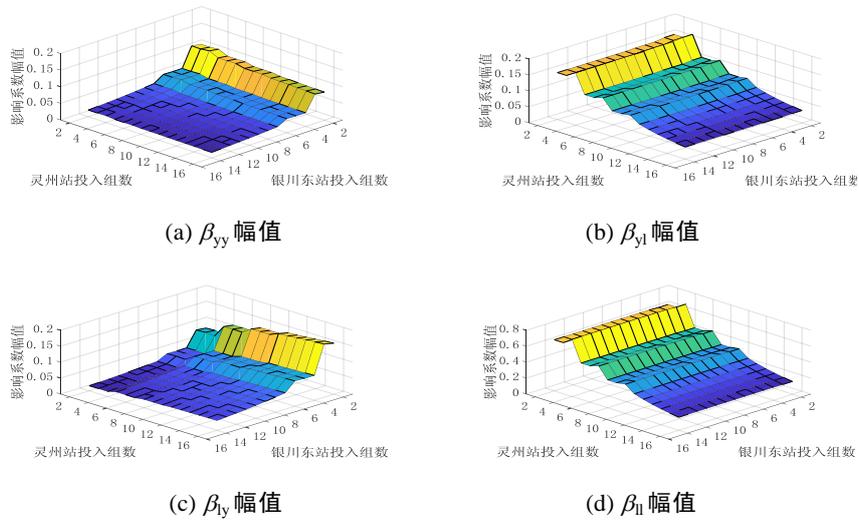


图 A2 交流滤波器不同组合投切方式下的 23 次谐波电流影响系数

Fig.A2 Influence coefficients of 23rd harmonic current under different combination switch schemes of AC filter

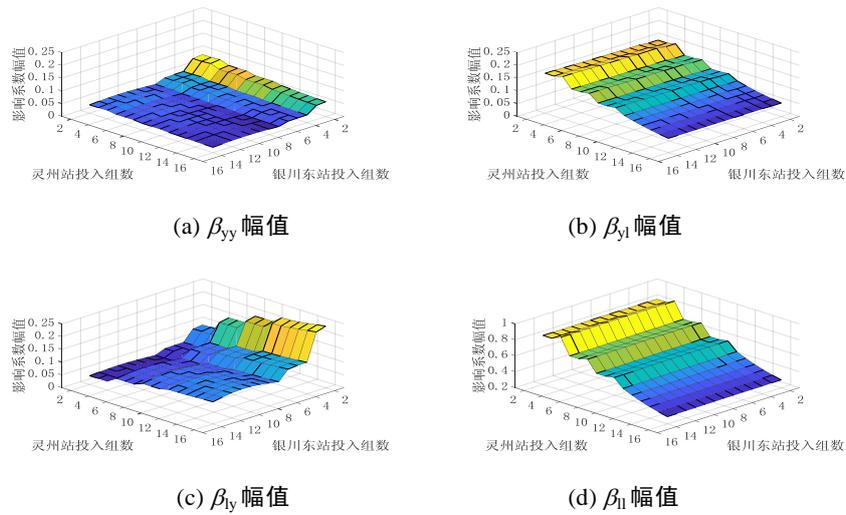
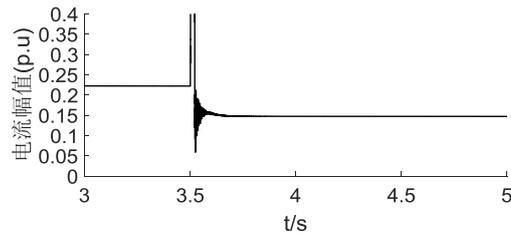
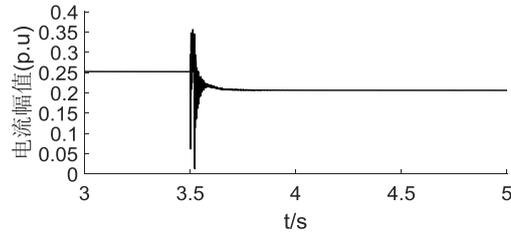


图 A3 交流滤波器不同组合投切方式下的 25 次谐波电流影响系数

Fig.A3 Influence coefficients of 25th harmonic current under different combination switch schemes of AC filter



(a) 23 次谐波电流



(b) 25 次谐波电路

图 A4 灵州站交流母线上谐波电流波形

Fig.A4 Waveforms of harmonic current on AC bus of Lingzhou Station

表 A1 灵州站交流母线上谐波电流的仿真结果和计算结果对比

Table A1 Comparison of simulative and calculated results of harmonic current on AC bus of Lingzhou Station

谐波次数	电流幅值 (投入前)		电流幅值 (投入后)	
	仿真结果	计算结果	仿真结果	计算结果
23	0.222 2	0.221 1	0.147 4	0.144 9
25	0.252 6	0.252 1	0.206 5	0.203 8