

计及变压器铁芯饱和的LCC-HVDC输电系统 谐波不稳定性评估与应用

刘 对, 李晓华, 蔡泽祥, 蔡苏斌

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:基于端口理论构建了基于电网换相换流器的高压直流(LCC-HVDC)输电系统的完整模型,综合考虑了直流两端换流器、平波电抗器、交直流滤波器以及换流变压器铁芯饱和的影响。利用该模型对不同的网络参数及运行工况进行谐波稳定性判别,并与PSCAD/EMTDC时域仿真平台上详细LCC-HVDC输电系统模型仿真结果对比,验证了所提模型的可行性与准确性。将所提模型应用于谐波不稳定性判别,不仅计算方法简单,而且能够较好地反映不同参数对谐波稳定性的影响,其对LCC-HVDC输电系统谐波不稳定影响因素分析可为LCC-HVDC输电系统的规划、运行提供参考。

关键词:LCC-HVDC输电系统;谐波不稳定性;二端口;开关函数

中图分类号:TM 721.1;TM 42

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202012028

0 引言

随着电力电子装备在电力系统中的广泛应用,谐波问题已成为电网中较为突出的问题之一^[1]。作为电力电子技术的实际应用,基于电网换相换流器的高压直流(LCC-HVDC)输电系统谐波问题尤为严峻^[2-4]。

近年来,电网中出现了多起因谐波导致直流保护误动的事件,严重影响了LCC-HVDC输电系统的安全稳定性^[3]。事故分析表明谐波经换流器及直流线路的转化、传递和放大后造成保护系统的误动。目前,已有文献针对LCC-HVDC输电系统谐波进行了相应的研究。文献[5]对LCC-HVDC输电系统变压器铁芯饱和的不稳定性问题进行研究,并且提出了稳定性的相应判据,但是该计算方法较为复杂;文献[6]提出了互补谐振的概念,分析了交、直流间相互影响产生的谐振。然而在实际LCC-HVDC输电系统中一旦发生谐波不稳定问题,上述2种现象往往同时存在。文献[7]分析了不同短路比对谐波不稳定性的影响,其采用的频率扫描方法虽然可以得到计及换流器交流侧频率的阻抗特性但并不能揭示谐波不稳定性的产生机理。文献[8]通过时域仿真分析LCC-HVDC输电系统谐波,该方法计算准确,但时域仿真通常具有较大的计算量且效率较低。文献[9]

利用开关函数对换流器的调制作用进行了相应的推导,并构建了LCC-HVDC输电系统送端谐波不稳定问题的判据,然而在该判据中并没有考虑变压器铁芯饱和问题,具有一定的局限性。文献[10]在文献[9]的基础上加入变压器铁芯饱和因素,构建了更加贴近实际的谐波不稳定性判据。文献[11-13]利用文献[10]的判据分别研究了单一LCC-HVDC输电单侧系统、双回并行LCC-HVDC输电系统以及多桥换流器LCC-HVDC输电系统的谐波稳定性,并分析了影响谐波不稳定性的因素。文献[14]提出衰减因子来判断LCC-HVDC输电系统的谐波稳定性。然而文献[11-14]中的判据仅考虑了LCC-HVDC输电系统的单侧换流器。由于LCC-HVDC输电系统通常包含送、受两端,每座换流站谐波的相互作用不仅受到自身的影响,还受到其他换流站影响,如果仅将某侧系统用一个理想电压源或电流源代替,通常会忽略其相应的阻抗频率特性对整个系统谐波不稳定性的影响。因此在分析LCC-HVDC输电系统谐波不稳定性时需要同时计及送、受两端的换流器对系统谐波不稳定性带来的影响^[15]。文献[15]推导了同时考虑送、受端交流系统与直流系统间交互影响的LCC-HVDC输电系统的谐波不稳定性判据。该判据虽然同时考虑了送、受端交流系统与直流系统之间的影响,但在直流侧没有考虑平波电抗器及直流滤波器,且在直流线路方面考虑得过于简单,没有计及直流线路的耦合关系以及谐波在线路的传输与放大情况^[16]。

鉴于此,本文基于端口理论建立了LCC-HVDC输电系统的谐波计算模型。该模型对LCC-HVDC输电系统进行了全系统建模,其中详细地介绍了变压器、换流器这2个非线性设备的建模过程以及直流输电线路的线性传输模型。在该分析模型的基础上

收稿日期:2020-08-21;**修回日期:**2020-11-06

基金项目:国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金资助项目(U1766213);国家自然科学基金资助项目(51677073)

Project supported by the Smart Grid Joint Fund of National Natural Science Foundation of China & State Grid Corporation of China(U1766213) and the National Natural Science Foundation of China(51677073)

推导了基于 2 次谐波,并同时考虑送、受端交流系统与直流系统间交互影响以及变压器铁芯饱和的 LCC-HVDC 输电系统的谐波不稳定性判据。将该模型与基于 PSCAD / EMTDC 的时域仿真结果进行对比分析,验证了所提方法的正确性。在不同运行工况及网络参数下利用该判据进行谐波稳定性判断,可用于 LCC-HVDC 输电工程规划初期稳定性的评估,为直流的规划与运行提供了相应的参考。

1 LCC-HVDC 输电系统谐波不稳定性机理及判据

LCC-HVDC 输电系统通常包含整流侧、逆变侧 2 座换流站,每座换流站的谐波相互作用不仅受其自身的影响,而且受其他换流站的影响^[15]。因此在分析 LCC-HVDC 输电系统谐波不稳定性时必须要考虑整流侧、逆变侧换流器对系统的影响。

1.1 LCC-HVDC 输电系统谐波不稳定性机理

典型的 LCC-HVDC 输电系统的结构见附录 A 图 A1。图中, R_{gr} 、 R_{gi} 分别为整流侧、逆变侧的接地极电阻; R_i ($i=1, 2, 3, 4$)、 C_i ($i=1, 2, 3, 4$) 和 L_i ($i=1, 2$) 分别为整流侧及逆变侧的电阻、电容和电感; L 为平波电抗器的电感; Q_{ij} 、 Q_{ji} ($j=1, 2, 3, \dots$) 分别为整流侧、逆变侧的断路器; U_{ac2} 、 I_{ac2} 分别为交流系统的 2 次谐波电压、电流; Y_{ac2} 为交流侧的等效 2 次导纳; Y_{con2} 为从换流变压器端口看入的包含直流侧正序 2 次谐波的等效导纳。

根据附录 A 图 A1,如果在换流器交流侧存在 2 次谐波电压扰动,该扰动电压经过换流器调制作用将在直流侧产生工频电压,从而在直流侧产生工频谐波电流;直流侧的工频电流经换流器调制后将在换流变压器阀侧产生正序 2 次谐波电流分量和直流电流分量。而直流电流在流过换流变压器时可能会使变压器铁芯饱和,产生大量的各次谐波电流,包括正序 2 次谐波电流。上述 2 次谐波电流共同作用于换流变压器阀侧 2 次谐波阻抗,产生正序 2 次谐波电压,从而形成 1 个双向正反馈^[5,15],如附录 A 图 A2 所示。经过上述正反馈激励,谐波放大导致 LCC-HVDC 输电系统的谐波不稳定性问题^[15]。因此,在分析谐波不稳定性时重点需要解决变压器的饱和和非线性、换流器的传递与放大以及直流输电线路的传输作用。

1.2 LCC-HVDC 输电系统谐波不稳定性判据

利用电路的基本等效变化,附录 A 图 A1 所示输电系统可以等效为图 1 所示电路,图中 I_s 、 V 分别为

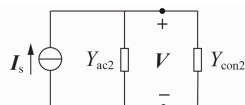


图 1 交直流系统的等效并联电路

Fig.1 Equivalent parallel circuit of AC / DC system

等效电流源、等效电压。

阻抗稳定性分析方法^[17]的本质是将系统分为电源和负载子系统。电流源电流 I_s 及交流系统导纳 Y_{ac2} 保持恒定,即:

$$V(s) = \frac{I_s(s)}{Y_{ac2}(s) + Y_{con2}(s)} = \frac{I_s(s)}{Y_{ac2}(s)} \frac{1}{1 + Y_{con2}(s)/Y_{ac2}(s)} \quad (1)$$

则系统的稳定性取决于传递函数 $G(s)$:

$$G(s) = 1 / (1 + Y_{con2}(s)/Y_{ac2}(s)) \quad (2)$$

式(2)相当于包含 1 个负反馈的闭环控制系统,该负反馈的前向通道增益是 1,同时反馈通道增益为 $Y_{con2}(s)/Y_{ac2}(s)$ 。根据线性控制理论分析可知,当 $Y_{con2}(s)/Y_{ac2}(s)$ 满足奈奎斯特不稳定判据时, $G(s)$ 是不稳定的。则系统谐波不稳定的充要条件为:

$$|Y_{con2}(s)/Y_{ac2}(s)| \geq 1 \text{ 且 } |\varphi(Y_{con2}(s)/Y_{ac2}(s))| \geq 180^\circ \quad (3)$$

其中, $\varphi(Y_{con2}(s)/Y_{ac2}(s))$ 为导纳比值的相角。因此,定义 $\xi = |Y_{con2}(s)/Y_{ac2}(s)|$ 、 $\delta = |\varphi(Y_{con2}(s)/Y_{ac2}(s))|$ 为系统谐波不稳定性判据。

从上述判据中可以看出,判断谐波不稳定的关键在于得到从换流变压器端口看入的包含直流侧正序 2 次谐波的等效导纳。而此部分包含了变压器、换流器、直流输电线路等直流输电系统的关键设备。鉴于此,本文采用端口等效模型计算等效导纳。

2 LCC-HVDC 输电系统谐波建模关键技术

由附录 A 图 A1 可知,LCC-HVDC 输电系统可以分解为不同的部分,图中的虚线部分表示端口网络,则可得到 LCC-HVDC 输电系统的等效端口原理图,如附录 A 图 A3 所示。根据直流输电的原理,需将交流系统连接到端口的末端。为了得到 LCC-HVDC 输电系统的等效电路,需对各部分进行建模,得到相应的端口网络。由于存在变压器铁芯饱和造成的非线性问题、换流器的非线性传递与放大作用及输电线路的传输作用这 3 方面的问题,需重点对 LCC-HVDC 输电系统的这 3 个部分进行建模。

2.1 变压器等效模型

变压器是 LCC-HVDC 输电系统中不可缺少的设备。以 Y-y 接线方式为例,换流变压器等效为二端口网络^[18],如图 2 所示。图中, n 为变压器变比; I_A 、 I_a 和 U_A 、 U_a 分别为变压器高压侧、低压侧电流和电压; X_T 为变压器等效电抗; T_T 为变压器等效矩阵。

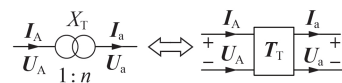


图 2 换流变压器的等效二端口网络

Fig.2 Equivalent two-port network of converter transformer

由变比的对应关系,可得式(4)中变压器等效端口矩阵 T'_T 的参数,详细推导见附录B式(B1)、(B2)。则变压器等效模型为:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ I_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T'_{T11} & T'_{T12} \\ T'_{T21} & T'_{T22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $T'_{T11} = 1/n$; $T'_{T12} = -nZ_T$, Z_T 为变压器对应频率处的阻抗; $T'_{T21} = 0$; $T'_{T22} = -n$ 。

当考虑变压器的铁芯饱和造成的直流偏磁效应所产生的谐波电流分量时,需要对等效的端口矩阵进行修正。现有文献[19]已证明:随着绕组中注入直流电流的增加,励磁电流的各次谐波呈逐渐增长趋势,谐波次数越高,增长幅度越小。其中2次谐波的线性程度最为明显且增长幅度明显高于其他各次谐波,因此本文着重考虑2次谐波分量的影响^[19]。

仅考虑变压器铁芯饱和时,采用经验转换矩阵 J 描述由于阀侧绕组直流电流注入而引起的正序2次谐波电流 i_{0s2+} ^[14]:

$$\begin{cases} i_{0s2+} = J [i_{sa0} \ i_{sb0} \ i_{sc0}]^T \\ J = \frac{1}{3} K e^{j180^\circ} [e^{j0^\circ} \ e^{-j120^\circ} \ e^{j120^\circ}] \end{cases} \quad (5)$$

其中, i_{sa0} 、 i_{sb0} 、 i_{sc0} 为注入换流变压器阀侧三相绕组的直流电流; K 为产生的正序2次谐波电流和换流变压器阀侧绕组注入直流的比值系数,该系数与变压器的结构特性、交流励磁状况等因素有关^[5],参考文献[15],将其取值为 0.71 ; $\frac{1}{3} [e^{j0^\circ} \ e^{-j120^\circ} \ e^{j120^\circ}]$ 为将直流

电流转换为正序2次谐波的变换矩阵, e^{j180° 为两者之间存在的相角差。

结合前文推导,考虑变压器的铁芯饱和造成直流偏磁效应所产生的2次谐波电流分量修正公式见式(6),详细推导过程见附录B式(B3)—(B5)。

$$T''_T = \begin{bmatrix} T''_{T11} & T''_{T12} \\ T''_{T21} & T''_{T22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $T''_{T11} = 0$; $T''_{T12} = -KZ_T [\sqrt{3}/(\pi\mu)] \sin(\mu/2)$, μ 为换流器的换相角; $T''_{T21} = 0$; $T''_{T22} = -K [\sqrt{3}/(\pi\mu)] \sin(\mu/2)$ 。

考虑变压器的铁芯饱和造成的直流偏磁效应所产生的2次谐波电流分量时,变压器的等效模型为:

$$T_T = T'_T + T''_T \quad (7)$$

2.2 换流器等效模型

换流器可以看作调制开关电路,用来连接直流系统和交流系统^[20]。通过调制的开关函数能将交直流系统中的电压与电流进行相应的转换。直流系统存在的高次非特征谐波的幅值比低次小得多^[21],因此只考虑低次非特征谐波电压即可。

若交流系统存在幅值为 U_f 的正序2次谐波电压扰动,则在换流器相应的调制作作用下,直流侧

产生的谐波分量次数将减少1,即得到幅值为 $(3\sqrt{3}/\pi) \cos(\mu/2) U_f$ 的50 Hz电压分量。同样若在换流器的直流侧存在幅值为 I_{dc} 的50 Hz电流分量,则在交流侧将分别产生幅值为 $[2\sqrt{3}/(\pi\mu)] \sin(\mu/2) I_{dc}$ 的100 Hz交流分量和直流分量^[21]。

根据分析交流与直流的对应关系,利用交直流侧之间的关系式,当 $n=1$ 时,可得换流器等效二端口电路的变换参数,详细推导见附录B式(B6)—(B8)。则换流器等效模型为:

$$\begin{bmatrix} U_{dch} \\ I_{dch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{C11} & T_{C12} \\ T_{C21} & T_{C22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{acp} \\ I_{acp} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $T_{C11} = (3\sqrt{3}/\pi) \cos(\mu/2)$; $T_{C12} = 0$; $T_{C21} = 0$; $T_{C22} = -1/\{[2\sqrt{3}/(\pi\mu)] \sin(\mu/2)\}$; I_{acp} 、 I_{dch} 和 U_{acp} 、 U_{dch} 分别为换流器两端的电流和电压。

2.3 直流线路传输模型

实际的LCC-HVDC输电线路通常为多条平行架设的导线组成,每条导线之间存在电磁耦合,电磁过程也较为复杂,求解时应先将其解耦。本文采用频率相关的模型^[22],以两相互感支路为例说明相间去互感原理,两相互感支路分别接于节点 p 、 q 和节点 r 、 w 之间,如图3所示。图中, Z_{pq} 、 Z_{rw} 和 Y_{pq} 、 Y_{rw} 分别为支路的自阻抗和自导纳; Z_m 、 Y_m 分别为两相间互阻抗、互导纳; U_i ($i=p, q, r, w$) 为节点电压; I_i ($i=p, q, r, w$) 为支路电流。

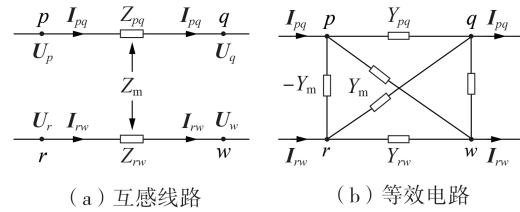


图3 两相互感支路及其等效电路

Fig.3 Mutual inductance circuit and equivalent circuit of two phase inductance

图3(a)中2条互感支路的支路电压方程为:

$$\begin{bmatrix} U_p - U_q \\ U_r - U_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pq} & Z_m \\ Z_m & Z_{rw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{pq} \\ I_{rw} \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过变换可以得到:

$$\begin{bmatrix} I_{pq} \\ I_{rw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pq} & Y_m \\ Y_m & Y_{rw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_p - U_q \\ U_r - U_w \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $Y_{pq} = Z_{rw}/(Z_{rw}Z_{pq} - Z_m^2)$; $Y_{rw} = Z_{pq}/(Z_{rw}Z_{pq} - Z_m^2)$; $Y_m = Z_m/(Z_{rw}Z_{pq} - Z_m^2)$ 。

根据式(9)、(10)可得消去互感的无互感等效电路,如图3(b)所示。其由4个节点和6条支路组成,各支路导纳值分别为 Y_{pq} 、 Y_m 、 Y_{rw} 。通过无互感的等效电路,可采用节点电压法列出对应的节点电压方

程为:

$$\begin{bmatrix} I_{pq} \\ I_{rw} \\ I_{qp} \\ I_{wr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pq} & Y_m & -Y_{pq} & -Y_m \\ Y_m & Y_{rw} & -Y_m & -Y_{rw} \\ -Y_m & -Y_m & Y_{pq} & Y_m \\ -Y_m & -Y_{rw} & Y_m & Y_{rw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_p \\ U_r \\ U_q \\ U_w \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 变压器和换流器的等效端口网络

变压器和换流器2个端口的级联如图4所示。图中, T_T 、 T_C 分别为第一、第二端口网络的 T 参数; T_1 为二端口网络级联后的 T 参数。

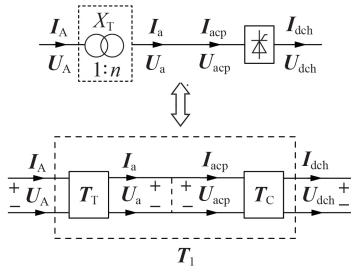


图4 端口级联

Fig.4 Port network cascading

利用电路理论的基本原理^[23],可以得到2个级联端口的等效表达式为:

$$T_1 = T_T T_C \quad (12)$$

即对于6脉动的直流输电系统,可得变压器和换流器的等效端口参数。此外,12脉动直流输电相当于2个6脉动系统的组合,如图5所示,其左侧为并联,右侧为串联。

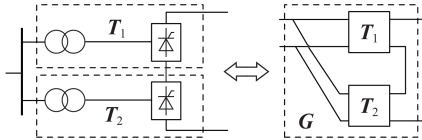


图5 串并联二端口网络

Fig.5 Two-port network in parallel and in series

为了便于计算,必须将2个端口的 T 参数转换为对应的 G 参数。假设端口网络的等效 T 参数 T_0 见式(13),则端口的等效 G 参数 G_0 见式(14)。

$$T_0 = \begin{bmatrix} T_A & T_B \\ T_C & T_D \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$G_0 = \frac{1}{T_A} \begin{bmatrix} T_C & -\Delta T \\ 1 & T_B \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, $\Delta T = T_A T_D - T_B T_C$, T_A 、 T_B 、 T_C 、 T_D 为 T 矩阵中的元素。

根据式(13)、(14),可得与12脉动系统相对应的2个端口网络的 G 参数。2个端口网络在左侧并联,在右侧串联,则连接参数见式(15)。

$$G = G_1 + G_2 \quad (15)$$

其中, G_1 、 G_2 分别为矩阵 T_1 、 T_2 转化成的 G 矩阵参数。

逆变器端采用类似的方法,唯一的区别是端口连接方式不同。采用该网络参数来表征变压器和换流器的准确性见附录C表C1。

根据各部分的等效端口网络,可得整个直流输电系统的等效端口模型。如果交流侧存在谐波电压 U_{ac2} ,采用等效端口模型可以计算出电流 I_{ac2} 的大小,从而可以得到 $Y_{con2} = I_{ac2}/U_{ac2}$ 。由于 Y_{ac2} 是已知的,这样结合式(3)就可以判断系统谐波的稳定性。

4 仿真分析

为了验证本文所提方法的正确性与有效性,将判据结果与PSCAD/EMTDC仿真结果进行对比。

4.1 LCC-HVDC输电系统仿真模型与谐波不稳定性仿真

利用PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件,基于CIGRE Benchmark标准测试系统^[24],结合文献[5]的测试系统搭建了如附录A图A1所示的双极1000 MW的LCC-HVDC输电系统模型。LCC-HVDC直流系统参数、交流系统参数见附录D表D1,交流滤波器参数与文献[24]相同。系统运行稳定后,在整流侧交流母线上添加100 Hz的电压扰动(0.1 s后扰动消失)。若扰动消失后,直流电流不衰减,即认为LCC-HVDC输电系统发生谐波不稳定性现象。

在PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真中,采用上述参数LCC-HVDC输电系统的直流电流波形如图6所示。从图中可以看出,直流系统的电流出现较大的振荡,不能恢复到原来的稳定状态,说明发生了谐波不稳定性现象。

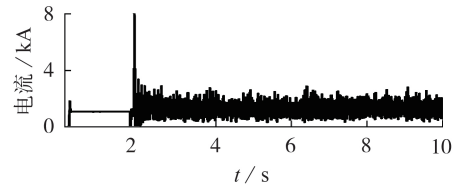


图6 LCC-HVDC输电系统的直流电流

Fig.6 DC current in LCC-HVDC transmission system

同样,根据上述参数采用本文所提判据对LCC-HVDC输电系统进行谐波不稳定性判断;按照判据的计算步骤,分别计算出该算例在计及变压器铁芯饱和、不计及变压器铁芯饱和2种情况下的幅值 ζ 与相角 δ 参数,利用这2个参数值判别系统谐波的不稳定性。同时,结合在PSCAD/EMTDC中记录的仿真波形进行验证。判据值与仿真结果如表1所示。

对比表1中数据可以发现,在计及变压器铁芯饱和的情况下,本文的判断结果与PSCAD/EMTDC的仿真结果相吻合;而忽略变压器铁芯饱和时判断结果与仿真结果出现一定偏差,说明了计及变压器铁芯饱和的LCC-HVDC输电系统谐波不稳定性判断

表1 谐波不稳定性判别值与仿真结果

Table 1 Discriminant value of harmonic instability and simulative results

条件	计算结果		判断结果
	ζ	$\delta / (^{\circ})$	
不计及变压器铁芯饱和	0.3010	0.0939	稳定
计及变压器铁芯饱和	1.6064	212.7010	不稳定
PSCAD / EMTDC 仿真			不稳定

的准确性与有效性。

此外,从图6及表1中的结果可知:扰动电压在经过换流器调制作用后,在直流侧引起工频电压,进而在直流侧产生工频谐波电流;直流侧的工频电流经换流器调制后将在换流变压器阀侧产生正序2次谐波电流分量和直流电流分量;而直流电流流过换流变压器使变压器铁芯饱和,产生正序2次谐波电流;上述正序2次谐波电流分量共同作用于换流变压器网侧2次谐波阻抗,并产生正序2次谐波电压,从而形成了一个双向正反馈,导致谐波不稳定。

4.2 LCC-HVDC 输电系统谐波不稳定性影响因素

在不同的运行工况以及网络参数(给出的参数为相应改变量)下利用该判据进行谐波不稳定性判断,并与PSCAD / EMTDC仿真平台中建立的验证模型仿真结果进行对比,对比结果见附录E表E1。所设置的仿真算例参数及算例仿真波形见附录E图E1。通过表E1的分析结果可知,不计及变压器铁芯饱和时判别结果与实际情况相比存在一定的误差;而计及变压器铁芯饱和时判别结果与实际仿真结果基本一致。这也说明了本文方法的准确性与有效性。下面将针对附录A图A1所示的系统从不同方面进行谐波不稳定影响因素分析。

4.2.1 送端系统对谐波不稳定性的影响

算例1、2在附录D表D1参数所示的算例(后文将称为基本算例)的基础上,修改电阻参数 R_1 进行验证。对比这3个算例可以发现,在减小送端系统的 R_1 时,系统发生谐波不稳定现象。算例3、4在基本算例的基础上修改电容参数 C_1 进行验证,同样对比这3个算例可以发现,在减小送端系统 C_1 时,系统出现谐波不稳定现象。上述算例表明送端系统的阻抗值对系统的谐波稳定性有较大的影响。在实际工程设计中可通过合理设计送端系统参数,避免系统不稳定现象的发生。

4.2.2 直流平波电抗器对谐波不稳定性的影响

算例5、6在基本算例的基础上修改直流系统的平波电抗器电感值进行验证,对比这3个算例可知,平波电抗器对LCC-HVDC输电系统的谐波稳定性同样具有一定的影响。在减小平波电抗器电感值的过程中,系统会发生谐波不稳定现象。因此,在选择平波电抗器时应计及其平波的效果与直流动态响应性

能等因素加以权衡。

4.2.3 受端系统对谐波不稳定性的影响

算例7—10为受端系统参数 R_3 、 C_3 变化的结果,通过分析可以发现,受端系统对谐波稳定性有较大的影响,且其影响关系与送端系统表现出一定的差异性;故仅考虑直流输电系统单端的谐波不稳定判据将会具有一定的片面性,应综合考虑送、受端共同影响且更加贴近工程实用的谐波不稳定性判据。

4.2.4 传输功率对谐波不稳定性的影响

算例11、12在基本算例的基础上修改直流传输功率进行验证。对比这3个算例的结果可知,降低直流系统的传输功率有利于减小谐波对系统稳定的影响,因此在LCC-HVDC输电系统运行过程中发生谐波不稳定现象时,可降低传输功率以提高系统的稳定性。

5 结论

针对LCC-HVDC输电系统的谐波不稳定问题,本文基于端口理论建立了LCC-HVDC输电系统的完整端口模型,重点介绍了变压器、换流器这2个非线性设备的建模过程以及直流输电线路的线性传输模型。该端口模型综合考虑了直流系统两端变压器、换流器、平波电抗器以及交流滤波器的影响,并在此基础上构建了谐波不稳定性判据。在不同的运行工况以及网络参数下进行谐波稳定性判断,并与PSCAD / EMTDC仿真结果进行对比,结果表明:

(1)本文基于端口模型构建的计及变压器铁芯饱和的判据判别结果与电磁暂态仿真结果相吻合,说明了本文方法的准确性与有效性;

(2)该判据能用于评估LCC-HVDC输电系统谐波不稳定性风险,对影响因素的分析可以为LCC-HVDC输电系统的设计以及避免运行阶段谐波不稳定现象的发生提供相应参考;

(3)本文提出的计及变压器铁芯饱和的LCC-HVDC输电系统谐波不稳定性评估方法可以推广应用到更复杂的多端高压直流输电系统中。

本文所提的判据由于没有考虑直流控制系统的影响而存在一定的误差,后续研究将集中在控制系统对LCC-HVDC输电系统的影响方面开展。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 黄涛,王胜利,谢华,等. 光伏逆变器短路电流3次谐波及其对保护的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 99-105.
HUANG Tao, WANG Shengli, XIE Hua, et al. Analysis of third harmonic current of photovoltaic inverter and its influence on protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 99-105.

- [2] 郑涛, 胡鑫. 特高压换流变故障性涌流产生机理及其对差动保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 109-115.
ZHENG Tao, HU Xin. Fault inrush current mechanism of UHV converter transformer and its impacts on differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 109-115.
- [3] MARVASTI F D, MIRZAEI A. A novel method of combined DC and harmonic overcurrent protection for rectifier converters of monopolar HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 892-900.
- [4] 郑涛, 国兴超, 胡鑫, 等. 逆变侧换流变压器故障性涌流产生机理及其对差动保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 39-45.
ZHENG Tao, GUO Xingchao, HU Xin, et al. Fault inrush current generation mechanism of inverter-side converter transformer and its influence on differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 39-45.
- [5] CHEN S, WOOD A R, ARRILLAGA J. HVDC converter transformer core saturation instability: a frequency domain analysis[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(1): 75-81.
- [6] YACAMINI R, DE-OLIVEIRA J C. Instability in HVDC schemes at low-order integer harmonics[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1980, 127(3): 179-188.
- [7] JIANG X, GOLE A M. A frequency scanning method for the identification of harmonic instabilities in HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(4): 1875-1881.
- [8] JIANG X, GOLE A M. An energy recovery filter for HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1): 119-127.
- [9] 樊丽娟, 穆子龙, 金小明, 等. 高压直流输电系统送端谐波不稳定问题的判据[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 62-68.
FAN Lijuan, MU Zilong, JIN Xiaoming, et al. Criterion of harmonic instability at sending end of HVDC power transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 62-68.
- [10] 魏玥, 刘天琪, 晏小彬, 等. 高压直流输电系统直流偏磁下的谐波不稳定判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 139-144.
WEI Yue, LIU Tianqi, YAN Xiaobin, et al. Study of harmonic instability criterion under DC magnetic bias in HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 139-144.
- [11] 刘俊磊. 交直流系统故障相互作用分析计算模型及其应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
LIU Junlei. Study on fault interaction analysis and calculation model of AC/DC system and its application[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [12] 丁媛媛, 刘天琪, 周胜军, 等. 双回并行直流输电谐波不稳定判据研究及改进[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 157-162.
DING Yuanyuan, LIU Tianqi, ZHOU Shengjun, et al. Study and improvement of harmonic instability criterion for parallel double-circuit HVDC transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 157-162.
- [13] 陈相, 刘天琪, 王顺亮, 等. 多桥换流器高压直流输电送端谐波不稳定分析与抑制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 46-52.
CHEN Xiang, LIU Tianqi, WANG Shunliang, et al. Analysis and suppression of harmonic instability for multi-bridge converter based HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 46-52.
- [14] 余瑜, 刘开培, 陈俊, 等. 基于调制理论的高压直流输电系统混合谐振型谐波不稳定判据[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1582-1589.
YU Yu, LIU Kaipei, CHEN Jun, et al. Modulation theory based criterion on composite resonant harmonic instability in HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1582-1589.
- [15] 卢智雪, 刘天琪, 陈相, 等. 考虑两端换流器影响的直流输电系统谐波不稳定风险评估[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 83-89.
LU Zhixue, LIU Tianqi, CHEN Xiang, et al. Risk assessment of harmonic instability in HVDC transmission systems considering effect of two-terminal converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 83-89.
- [16] 李晓华, 吴立珠, 丁晓兵, 等. 基于直流线路参数的50 Hz谐波放大评估方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 146-151.
LI Xiaohua, WU Lizhu, DING Xiaobing, et al. Evaluation method of 50 Hz harmonic amplification based on DC line parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 146-151.
- [17] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [18] KUNDUR P, BALU N J, LAUBY M G. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill Education, 1994: 231-245.
- [19] 陈浩, 李琳, 许正梅. 换流变压器铁心饱和型不稳定性预测[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 108-113.
CHEN Hao, LI Lin, XU Zhengmei. Prediction of core saturation instability at converter transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 108-113.
- [20] YOSHIDA H, WADA K. Third-harmonic current suppression for power distribution systems under unbalanced installation of DG units[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5578-5585.
- [21] HU L H, MORRISON R E. The use of modulation theory to calculate the harmonic distortion in HVDC systems operating on an unbalanced supply[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(2): 973-980.
- [22] ZHANG Y K, LI Y L, SONG J Z, et al. A new protection scheme for HVDC transmission lines based on the specific frequency current of DC filter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 420-429.
- [23] ALEXANDER C K, SADIKU M N. Fundamentals of electric circuits[M]. 6th ed. New York, USA: McGraw-Hill Education, 2015: 853-905.
- [24] SZECHTMAN M, WESS T, THIO C V. First benchmark model for HVDC control studies[J]. Electra, 1991, 4(135): 55-75.

作者简介:



刘 对

刘 对(1990—),男,湖北襄阳人,博士研究生,主要研究方向为高压直流输电故障分析及控制(E-mail: 201710101807@mail.scut.edu.cn);

李晓华(1975—),女,湖北黄石人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为电力系统故障分析与继电保护、直流输电控制与保护(E-mail: eplxh@scut.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Harmonic instability evaluation of LCC-HVDC transmission system considering transformer core saturation and its application

LIU Dui, LI Xiaohua, CAI Zexiang, CAI Subin

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A complete model of LCC-HVDC (Line Commutated Converter based High Voltage Direct Current) transmission system is constructed based on port theory, and the effects of converters at both ends of LCC-HVDC, smoothing reactors, AC/DC filters and the saturation of converter transformer core are comprehensively considered. The model is used to analyze the harmonic stability under different network parameters, operating conditions, and compared with the simulative results of detailed LCC-HVDC transmission system model on PSCAD/EMTDC time domain simulation platform, which verifies the feasibility and accuracy of the proposed model. The proposed model applied to the identification of harmonic instability is not only simple to calculate, but also can reflect the influence of different parameters on the harmonic stability. The analysis of influencing factors on harmonic instability can provide reference for the planning and operation of LCC-HVDC transmission system.

Key words: LCC-HVDC transmission system; harmonic instability; two-port; switching function

(上接第84页 continued from page 84)

Quantitative analysis of interaction between different control loops in hybrid dual-infeed HVDC system

ZHANG Fang, YANG Zhongyao

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With the development of HVDC (High Voltage Direct Current) projects, the interaction within hybrid dual-infeed HVDC system has attracted extensive attention. In order to further clarify the internal interaction mechanism of hybrid dual-infeed HVDC system, quantitative analysis of coupling effect between different control loops in hybrid dual-infeed HVDC system is investigated through relative gain array method in control theory. Then, the effects of factors such as the AC system strength, tie-line length, HVDC power transmission level and power oscillation frequency of DC system on coupling degree between different control loops are studied. Finally, the electromagnetic transient simulation model is built to verify that the proposed method can quantitatively analyze the generation mechanism of interaction within hybrid dual-infeed HVDC system.

Key words: hybrid dual-infeed HVDC system; relative gain array; control loops; interaction; coupling degree; quantitative analysis

附录 A

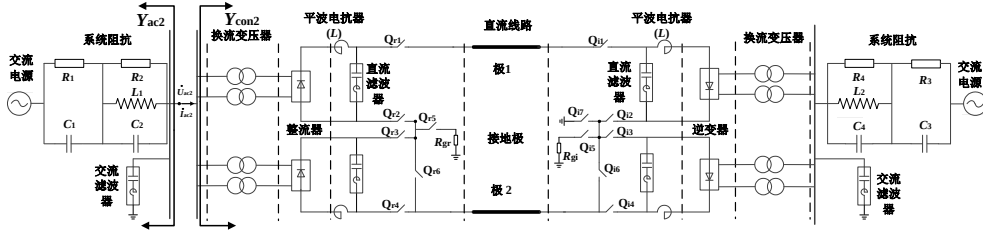


图 A1 基于电网换相换流器的高压直流输电系统图

Fig.A1 LCC-HVDC transmission system diagram

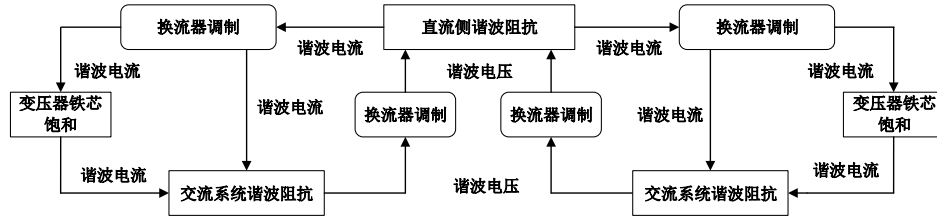


图 A2 谐波通过换流器调制形成的环路

Fig.A2 Loop of harmonic transferring through converter

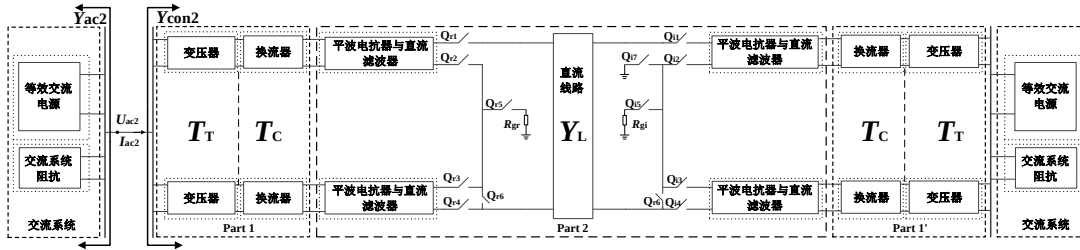


图 A3 端口等效原理图

Fig.A3 Equivalent principal diagram of port

附录 B

(1) 根据文中图 2 以及变压器的特性可得：

$$\begin{cases} \frac{U_A - Z_T I_A}{U_a} = \frac{1}{n} \\ I_A = -n I_a \end{cases} \quad (B1)$$

对式 (B1) 进行变换可得：

$$\begin{bmatrix} U_A \\ I_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/n & -nZ_T \\ 0 & -n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad (B2)$$

(2) 根据参考文献[21]可知：如果在换流器的直流侧有幅值为 I_{dc} 的 50 Hz 电流，则在交流侧将产生幅值分别为 $\left[2\sqrt{3}/(\pi\mu)\right]\sin(\mu/2)I_{dc}$ 的 100 Hz 电流分量以及直流分量。 μ 为换流器的换相角。结合式 (5) 可得在换流变压器网侧产生的 2 次谐波电流为：

$$I_{ac2,0} = -K \frac{\sqrt{3}}{\pi\mu} \sin \frac{\mu}{2} I_{dc} \quad (B3)$$

该电流在交流系统阻抗上产生新的 2 次谐波电压为：

$$U_{ac2_0} = Z_T I_{ac2_0} \quad (B4)$$

综合式 (B3)、(B4) 可得：

$$\begin{bmatrix} U_{ac2_0} \\ I_{ac2_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -Z_T K \frac{\sqrt{3}}{\pi \mu} \sin \frac{\mu}{2} \\ 0 & -K \frac{\sqrt{3}}{\pi \mu} \sin \frac{\mu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{dc} \\ I_{dc} \end{bmatrix} \quad (B5)$$

(3) 当换流器等效为 1 个二端口网络时，可得：

$$\begin{cases} U_{dc_50} = \left(\frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\mu}{2} \right) U_{ac_100} \\ I_{ac_100} = - \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi \mu} \sin \frac{\mu}{2} \right) I_{dc_50} \end{cases} \quad (B6)$$

对式 (B6) 进行变换可得：

$$\begin{cases} U_{dc_50} = \left(\frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\mu}{2} \right) U_{ac_100} \\ I_{dc_50} = - \left[1 / \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi \mu} \sin \frac{\mu}{2} \right) \right] I_{ac_100} \end{cases} \quad (B7)$$

令 U_{dc_50} 、 I_{dc_50} 、 U_{ac_100} 、 I_{ac_100} 分别等于 U_{dch} 、 I_{dch} 、 U_{acp} 、 I_{acp} ，即可得：

$$\begin{bmatrix} U_{dch} \\ I_{dch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\mu}{2} & 0 \\ 0 & -1 / \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi \mu} \sin \frac{\mu}{2} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{acp} \\ I_{acp} \end{bmatrix} \quad (B8)$$

附录 C

如图 5 所示的网络中，当换流器的直流侧出口存在 50 Hz 大小为 70.9 V、0.000 1 kA 的电压、电流时，采用文中建立的模型（这里采用端口网络的 T 参数）来计算变压器（容量 989.5 MV·A，变比 525/210.75，漏抗 0.18 p.u.）高压侧 100 Hz 的电压、电流值；得到的解析值与采用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件的仿真结果对比如下。

表 C1 解析值与仿真结果对比

Table C1 Comparison of analytical values and simulation results		
方法	变压器高压侧电压/V	变压器高压侧电流/kA
PSCAD/EMTDC 仿真	53.8	0.000 2
解析值	53.1	0.000 1

对比表 C1 中的结果可以发现，采用文中的模型得到的解析值与 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件的仿真结果基本一致，说明了文中建立的变压器与换流器解析模型的正确性。

附录 D

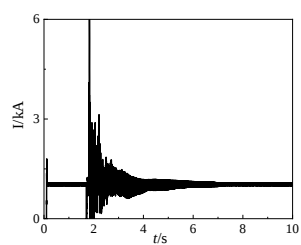
表 D1 仿真模型的参数
Table D1 Parameters of simulation model

参数	数值	参数	数值
额定功率	1 000 MW	额定电流	1 kA
额定电压	±500 kV	直流线路长度	1 254 km
整流侧变压器容量	989.5 MV·A	平波电抗器 L	0.15 H
逆变侧变压器容量	903.73 MV·A	R_1, R_3	30 Ω
整流侧变压器漏抗	0.18 p.u.	R_2, R_4	1 000 Ω
逆变侧变压器漏抗	0.18 p.u.	L_1, L_2	0.004 725 H
整流侧变压器变比	525/210.75	C_1, C_3	4 300 μF
逆变侧变压器变比	525/198.55	C_2, C_4	509.8 μF

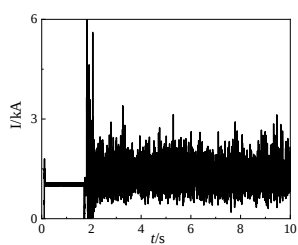
附录 E

表 E1 谐波不稳定性判别值与仿真结果
Table E1 Discriminant value of harmonic instability and simulative results

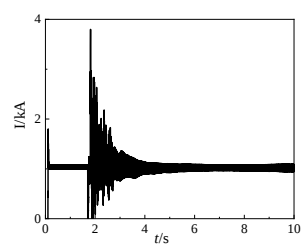
算例	不考虑变压器饱和				计及变压器饱和				仿真结果
	ζ	$\delta / (^\circ)$	判断结果		ζ	$\delta / (^\circ)$	判断结果		
整流侧	1	0.317 5	0.156 3	稳定	0.871 4	174.260 2	稳定	稳定	
	2	0.292 2	0.067 4	稳定	1.586 1	219.102 5	不稳定	不稳定	
	3	0.317 6	0.167 3	稳定	0.869 5	174.195 2	稳定	稳定	
	4	0.300 8	0.084 0	稳定	1.571 1	208.587 1	不稳定	不稳定	
直流侧	5	0.247 4	4.199 8	稳定	0.700 0	169.098 4	稳定	稳定	
	6	0.387 6	2.632 0	稳定	1.868 1	199.772 8	不稳定	不稳定	
	7	0.289 1	0.056 3	稳定	1.499 5	208.082 6	不稳定	不稳定	
逆变侧	8	0.292 5	0.064 5	稳定	1.595 0	223.703 4	不稳定	不稳定	
	9	0.317 3	0.167 1	稳定	0.869 0	174.193 2	稳定	稳定	
	10	0.317 6	0.148 5	稳定	0.874 0	174.329 0	稳定	稳定	
功率	11	0.301 7	0.097 1	稳定	1.444 5	198.328 6	不稳定	不稳定	
	12	0.318 0	0.152 7	稳定	0.910 0	175.135 7	稳定	稳定	



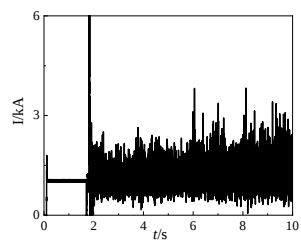
(a) 算例 1 ($R_1=35\ \Omega$)



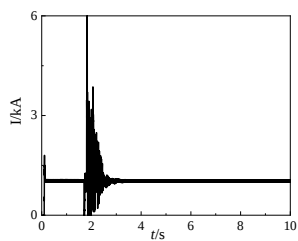
(b) 算例 2 ($R_1=25\ \Omega$)



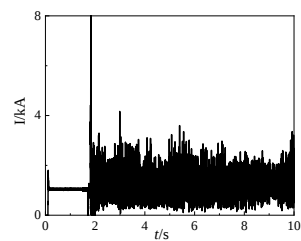
(c) 算例 3 ($C_1=4\ 450\ \mu\text{F}$)



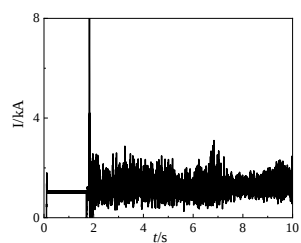
(d) 算例 4 ($C_1=4\ 150\ \mu\text{F}$)



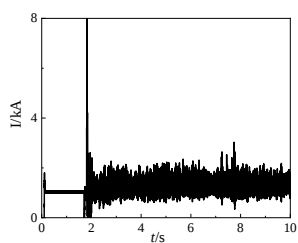
(e) 算例 5 ($L=0.225\ \text{H}$)



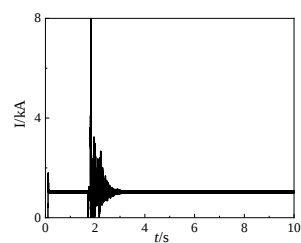
(f) 算例 6 ($L=0.075\ \text{H}$)



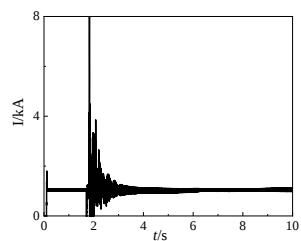
(g) 算例 7 ($R_3=35\ \Omega$)



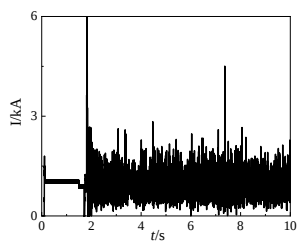
(h) 算例 8 ($R_3=25\ \Omega$)



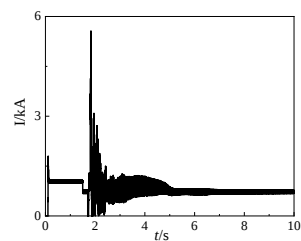
(i) 算例 9 ($C_3=4\ 450\ \mu\text{F}$)



(j) 算例 10 ($C_3=4\ 150\ \mu\text{F}$)



(k) 算例 11 ($P=0.85\ \text{p.u.}$)



(l) 算例 12 ($P=0.7\ \text{p.u.}$)

图 E1 LCC-HVDC 直流电流
Fig.E1 DC current in LCC-HVDC system