

考虑换相过程的电网换相换流器 小信号阻抗建模

张纯^{1,2}, 李小鹏^{1,2}, 成清儿³, 王顺亮³, 马俊鹏³, 刘天琪³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 电力物联网四川省重点实验室, 四川 成都 610041;

3. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:建立准确的数学模型对于判断电力系统稳定性具有重要意义,其中阻抗模型凭借简单有效的优势成为判断系统稳定性的常用工具。为完成考虑换相过程的电网换相换流器阻抗建模,在 dq 坐标系下采用了基于平均化的小信号建模方法。首先,将换相重叠过程中各物理量的非线性变化过程利用小信号法线性化,建立了物理量之间的传递函数;然后,加入了交流电源侧的交流网络简化模型,同时考虑了定电压控制方式和锁相环的建模,得到电网换相换流器直流侧和交流侧的等效阻抗模型;最后,通过对比PSCAD/EMTDC仿真结果和模型计算结果,证明了阻抗模型的准确性。

关键词:电网换相换流器;小信号模型;换相重叠过程;复向量

中图分类号:TM 732 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2024)02-0005-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240202

Small-signal Impedance Modeling of Line-commutated Converter with Commutation Overlap

ZHANG Chun^{1,2}, LI Xiaopeng^{1,2}, CHENG Qing'er³, WANG Shunliang³, MA Junpeng³, LIU Tianqi³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Sichuan

Provincial Key Laboratory of Power Internet of Things, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to judge the stability of a power system, it is of great significance to establish an accurate model, among which the impedance model has become a common tool for judging system stability due to its simplicity and effectiveness. In the dq coordinate system, the small-signal modeling method based on averaging is adopted to complete the impedance modeling of line-commutated converter (LCC) which considers commutation overlap. Firstly, the nonlinear change process of each physical quantity in commutation overlap process is linearized by the small-signal method, and the transfer function between physical quantities is established. And then, the equivalent impedance model of DC side and AC side of LCC is obtained by introducing simplified model of AC network in AC side and considering the modeling of constant voltage control mode and phase-locked loop. Finally, by comparing PSCAD/EMTDC simulation results and model calculation results, the accuracy of the proposed impedance model is proved.

Key words: line-commutated converter; small-signal model; commutation overlap; complex space vector

0 引言

由于中国能源和用电量呈逆向分布,具有远距

离、大容量传输能力的电网换相换流器高压直流输电(line-commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)技术迅速发展,电网失稳事故的影响越发显著^[1-3]。建立准确的数学模型是研究系统稳定性等问题的基础。阻抗模型凭借其简单有效的优势,成为判断系统稳定性的常用工具,因

此建立准确的 LCC-HVDC 阻抗模型具有十分重要的意义^[4]。

受到换相重叠过程以及交流系统动态过程等因素的影响,换流器建模中的难点是线性化模型的建立^[5]。综合现有文献,目前对于换流器线性化进行了诸多研究。文献[6]为了实现线性化处理,采用了转换函数方法,对高压直流输电系统中定电流控制方式进行了建模,得到了准确的传递函数表达式并获得了系统的频率响应。文献[7]得到了换流器的频域线性化模型,采用的方法是将直流侧电压和交流侧线电流的非线性过程分段线性化。文献[8-9]采用了不同的线性化处理方式,通过推导空间矢量传递函数将动态过程线性化,从而得到了高压直流输电系统的线性化模型。文献[10]在文献[9]的基础上作出了进一步的完善,提高了换流器频域线性化模型在更高次谐波的准确性,这种模型的前提是满足无限个六脉动换流器级联的高压直流输电系统的假设,模型在利用传递函数建模之外,还考虑了关断角的测量采样和换相电感动态特性对模型验证的影响。

准确的模型是对输电系统进行稳定性分析的基础,为了得到考虑换相过程且物理意义明确的 LCC 阻抗模型,采用 dq 坐标系下的小信号建模方法,对电网换相换流器的阻抗进行了建模。将换相过程和非换相过程进行平均化处理,在稳态运行点附近对 LCC 进行线性化,得到线性非时变的换流器传递函数;最后,联立各传递函数建立准确的 LCC 阻抗模型。

1 LCC 传递函数的建模

1.1 小信号的建模

对于传统两电平换流器,坐标变换可以将换流器模型转换到同步旋转坐标系,从而将正弦变量转化为直流量。在静止坐标系中,无零序分量的三相电压和电流可以用斜体实空间向量和复空间向量表示,如 dq 坐标向量可以用下标“ dq ”表示,如式(1)所示。

$$\mathbf{v}_{dq} = [v_d, v_q]^T \leftrightarrow \mathbf{v}_{dq} = v_d + jv_q \quad (1)$$

在受到小扰动后,电力系统仍能保持稳定的能力称为小信号稳定性。在系统的平衡点处将非线性系统线性化可以推出小信号模型^[11]。电力系统可用式(2)描述。

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (2)$$

式中: \mathbf{y} 为系统运行变量向量; \mathbf{x} 为系统的状态变量向量; $f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 为描述系统状态的微分方程组^[12]。 x_0, y_0 分别为向量 \mathbf{x}, \mathbf{y} 对应的平衡点,将小扰动加入平衡点后,表达式如式(3)所示。

$$\dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{x}}_0 + \Delta \dot{\mathbf{x}} = f[(x_0 + \Delta \mathbf{x}), (y_0 + \Delta \mathbf{y})] \quad (3)$$

将非线性微分方程组线性化,即用泰勒级数展开,并忽略二阶及高阶项,即可得到线性化模型。

下面对基于 dq 变换后的模型进行了平均化的处理以有利于将非线性过程线性化,即在换流器模型的建立中,各个量不再实时跟随时间变化呈现非线性特性,而是在一个周期内的平均值。为了平均化处理顺利进行,需要作出以下假设^[13]:

- 1) 交流电压源为正弦波且三相对称;
- 2) 变压器无内电阻;
- 3) 换相等效电抗三相平衡;
- 4) 换流阀为理想器件且等间隔触发。

平均法即将变化的周期信号在一个周期中进行平均,目的是将时变系统转化为定常系统,从而有利于后续的建模。对于周期函数 $f(t)$, 其平均化如式(4)所示。

$$\bar{f}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(x) dx \quad (4)$$

式中: t 为时间; T 为平均化周期。

1.2 换相重叠过程分析

LCC 拓扑结构如图 1 所示,由 6 个晶闸管组成。图 1 中: L 为变压器等效电感; v_a, v_b, v_c 为换流母线电压; i_a, i_b, i_c 为三相线电流; i_{dc} 为直流电流; U_{dc} 为直流电压。

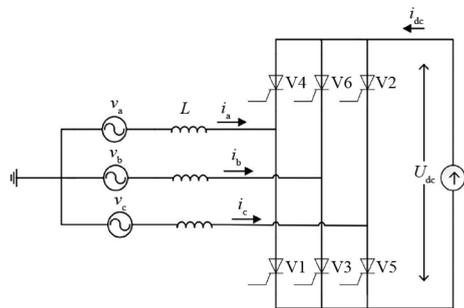


图 1 考虑换相过程的六脉动

换相重叠过程是 LCC 的一个显著特征,以从阀 2 换相阀 4 为例,图 2 显示了在换相过程中直流电压和交流电流的变化。其中: α 为触发角; δ 为换相重叠结束角; φ_1 和 φ_c 分别为换相开始瞬间角度和换相结束瞬间的角度; μ 为换相重叠角度。在换相重叠过程中,换流器中会有 3 个换流阀同时导通,直流电压是其导通时的一半,线电流呈现非

线性变化。

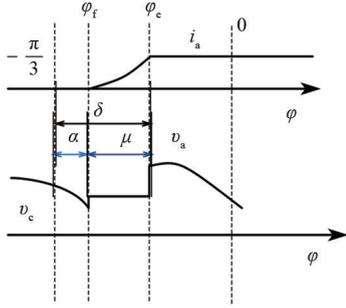


图2 换相重叠过程

由图1和图2可以得到:换相重叠过程受触发角、相电压、直流侧电流和变压器漏感的影响^[14];直流电压受触发角、换相重叠过程、直流侧电流和相电压的影响。

1.3 换相重叠关断角小信号传递函数

以从阀2换相阀4为例,换相过程中,阀2、阀3、阀4同时导通,根据基尔霍夫电压定律可以得到电压电流关系如式(5)所示。

$$v_a - L \frac{di_a}{dt} = v_c - L \frac{di_c}{dt}, i_a + i_c = i_{dc} \quad (5)$$

两式联立并转移到 dq 坐标系下可得式(6)。

$$2L \frac{di_a}{dt} = \sqrt{3} \left[v_d \cos(\varphi - \frac{\pi}{6}) - v_q \sin(\varphi - \frac{\pi}{6}) \right] \quad (6)$$

将等式两边进行积分可以得到式(7)。

$$i_a(\varphi) = \frac{\sqrt{3}}{2X_c} \left[v_d \sin(\varphi - \frac{\pi}{6}) + v_q \cos(\varphi - \frac{\pi}{6}) \right] - \frac{\sqrt{3}}{2X_c} \left[v_d \sin(\varphi_f - \frac{\pi}{6}) + v_q \cos(\varphi_f - \frac{\pi}{6}) \right] \quad (7)$$

式中, $X_c = \omega_0 L_c$ 为变压器漏抗。由图2分析可得 $\varphi = \varphi_c$ 时, $i_a = i_{dc}$, $i_c = 0$ 。将两值代入式(7),可以得到关于 φ_c 的关系式。

$$i_{dc} = \frac{\sqrt{3}}{2X_c} \left[v_d \sin(\varphi_c - \frac{\pi}{6}) + v_q \cos(\varphi_c - \frac{\pi}{6}) \right] - \frac{\sqrt{3}}{2X_c} \left[v_d \sin(\varphi_f - \frac{\pi}{6}) + v_q \cos(\varphi_f - \frac{\pi}{6}) \right] \quad (8)$$

再将式(8)进行线性化,并根据小扰动量将等式进行整合,可以得到换相重叠关断角 δ 关于触发角、相电压、直流侧电流和变压器漏感的传递函数如式(9)所示。式中,下标带有0的变量为对应变量的平衡点。

$$\begin{aligned} \Delta\delta = & -\Delta\alpha \frac{v_{q0} \sin(\varphi_{f0} - \frac{\pi}{6}) - v_{d0} \cos(\varphi_{f0} - \frac{\pi}{6})}{v_{d0} \cos(\varphi_{e0} - \frac{\pi}{6}) - v_{q0} \sin(\varphi_{e0} - \frac{\pi}{6})} + \\ \Delta i_{dc} \frac{X_c}{\sqrt{3}} \frac{2}{v_{d0} \cos(\varphi_{e0} - \frac{\pi}{6}) - v_{q0} \sin(\varphi_{e0} - \frac{\pi}{6})} - \\ \Delta v_d \frac{\sin(\varphi_{e0} - \frac{\pi}{6}) - \sin(\varphi_{f0} - \frac{\pi}{6})}{v_{d0} \cos(\varphi_{e0} - \frac{\pi}{6}) - v_{q0} \sin(\varphi_{e0} - \frac{\pi}{6})} - \\ \Delta v_q \frac{\cos(\varphi_{e0} - \frac{\pi}{6}) - \cos(\varphi_{f0} - \frac{\pi}{6})}{v_{d0} \cos(\varphi_{e0} - \frac{\pi}{6}) - v_{q0} \sin(\varphi_{e0} - \frac{\pi}{6})} \end{aligned} \quad (9)$$

1.4 直流侧电压小信号传递函数

由换相过程分析可得,直流侧电压的表达可以分为换相重叠过程和非换相重叠过程两部分。 u_{dc1} 和 u_{dc2} 分别是换相重叠过程和直接导通过程的输出直流侧电压,转化到 dq 坐标系下,同时考虑当直流电压 i_{dc} 发生变化时,会在漏感上产生感应电压,从而影响输出直流电压,可以得到式(10)。

$$\begin{cases} u_{dc1} = \frac{3}{2} \left[v_q \sin(\varphi + \frac{\pi}{3}) - v_d \cos(\varphi + \frac{\pi}{3}) \right] + \\ \quad \frac{3}{2} L \frac{di_{dc}}{dt}, \alpha - \frac{\pi}{3} < \varphi < \delta - \frac{\pi}{3} \\ u_{dc2} = \sqrt{3} \left[v_q \sin(\varphi + \frac{\pi}{6}) - v_d \cos(\varphi + \frac{\pi}{6}) \right] + \\ \quad \sqrt{3} L \frac{di_{dc}}{dt}, \delta - \frac{\pi}{3} < \varphi < \alpha \end{cases} \quad (10)$$

对式(10)应用平均法来求得直流侧电压的表达式,将表达式转移到频域并在平衡工作点处线性化,可以得到直流侧电压传递函数如式(11)所示。

$$\begin{aligned} \Delta u_{dc} = & \Delta\alpha \cdot \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cdot (v_{d0} \sin\alpha_0 + v_{q0} \cos\alpha_0) + \\ & \Delta v_q \cdot \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cdot (\sin\delta_0 + \sin\alpha_0) - \\ & \Delta v_d \cdot \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cdot (\cos\alpha_0 + \cos\delta_0) + \\ & \Delta\delta \cdot \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cdot (v_{d0} \sin\delta_0 + v_{q0} \cos\delta_0) + \\ & \Delta i_{dc} \cdot sL(2 - 3\mu_0/2\pi) \end{aligned} \quad (11)$$

1.5 交流电流小信号传递函数

根据图 1 分析可得,线电流的表达可以分为换相重叠过程和非换相重叠过程两部分,根据电路分析,转移到 dq 坐标系下可得式(12)。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_{d1}(\varphi) \\ i_{q1}(\varphi) \end{bmatrix} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \begin{bmatrix} i_a \cos(\varphi - \frac{\pi}{6}) - i_{dc} \sin \varphi \\ -i_a \sin(\varphi - \frac{\pi}{6}) - i_{dc} \cos \varphi \end{bmatrix}, & \varphi_f < \varphi < \varphi_e \\ \begin{bmatrix} i_{d2}(\varphi) \\ i_{q2}(\varphi) \end{bmatrix} = \frac{2\sqrt{3}}{3} i_{dc} \begin{bmatrix} \cos(\varphi + \pi/6) \\ -\sin(\varphi + \pi/6) \end{bmatrix}, & \varphi_e < \varphi < \alpha \end{cases} \quad (12)$$

将式(7)代入式(12)后,在相邻脉冲之间的间隔($\pi/3$)内积分,进行平均化处理可以得到 i_d 、 i_q 的表达式如式(13)所示。

$$\begin{aligned} i_d = & i_{dc} (2\sqrt{3}/\pi) [\cos(\delta - \pi/3) + \cos(\delta + \pi/3)] + \\ & 3/(\pi X_c) (v_q \sin \alpha - v_d \cos \alpha) (\cos \delta - \cos \alpha) + \\ & \frac{3}{\pi X_c} [v_d (\cos 2\delta - \cos 2\alpha)/4 + v_q (\delta - \alpha)/2 - \\ & v_q (\sin 2\delta - \sin 2\alpha)/4] \end{aligned} \quad (13)$$

对式(13)进行线性化处理,即可得到交流电流的传递函数。

2 控制系统的建模

换流器的控制系统主要由触发角控制器和锁相环(phase-locked loop, PLL)构成,由于是对逆变站进行建模,故采用了常用的定电压控制方式。为了后续仿真的顺利进行,锁相环原理与 PSCAD 中的锁相环保持一致。控制系统结构如图 3 所示。当定直流电压控制的输出触发角 α 与锁相环的输出相等时,控制系统发出触发脉冲。当系统母线电压或者直流电流受到扰动时,系统锁相环输出及定直流电压输出则会产生扰动,使触发脉冲产生扰动。

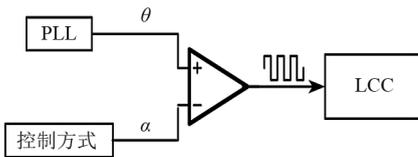


图 3 控制系统结构

2.1 定电压控制建模

定压控制是通过互感器采集换流站直流电压 U_{dc} 作为控制系统的输入量,经过低通滤波后,与要求的参考电压进行比较,取两者差值后经 PI 控制器

生成触发角 α 。原理如图 4 所示。

定电压控制的小信号传递函数为

$$G_c = (k_p + k_i/s) \cdot G/(1 + sT) \quad (14)$$

式中: k_p 、 k_i 分别为电压控制器中 PI 调节器比例、积分系数; G 为低通滤波器增益; T 为低通滤波器时间常数; s 为拉普拉斯算子。

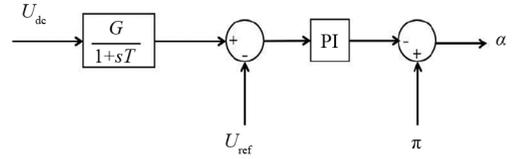


图 4 定电压控制原理

2.2 锁相环建模

在换流器中,锁相环的作用是同步交流母线电压。在 dq 坐标系下,对锁相环产生影响的主要是交流电压的 q 轴分量。它通过 Δv_q 的变化量来测量交流母线电压相角变化,再利用负反馈来实现触发角的修正,最终使相位同步^[15]。在研究中,锁相环原理如图 5 所示。

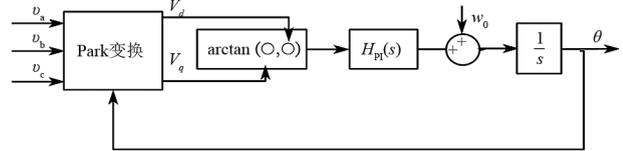


图 5 锁相环原理

图 5 中 θ 为锁相环输出的交流母线电压相位角,同时也是交流母线电压在 d 轴和 q 轴分量之间的夹角,可得 V_{dq} 表示为:

$$v_{dq} = v_d + jv_q \quad (15)$$

$$v_{dq} = v_{abc} e^{-j\theta} \quad (16)$$

在式中加入小扰动量并进行等价无穷小替换后,可得到式(17)。

$$v_{abc} e^{-j\theta} = (v_{d0} + \Delta v_{dq}) e^{-j\Delta\theta} \approx (v_{d0} + \Delta v_{dq})(1 - j\Delta\theta) \quad (17)$$

此时与式(15)进行联立可得到

$$\begin{aligned} v_d + jv_q = & v_{d0} + \Delta\theta \cdot \Delta v_q + j(\Delta v_q - v_{d0} \cdot \Delta\theta - \\ & \Delta\theta \cdot v_d) \Rightarrow v_d \approx v_{d0}, v_q \approx \Delta v_q - v_{d0} \cdot \Delta\theta \end{aligned} \quad (18)$$

图 5 中 \arctan 为反三角函数,在 v_d 、 v_q 分别为反切函数的分母和分子后,进行反变换可得到

$$\frac{v_q}{v_d} = \frac{v_{d0}}{\Delta v_q - v_{d0} \cdot \Delta\theta} = \tan \frac{s \cdot \Delta\theta}{k_p + k_i/s} \quad (19)$$

经过等价无穷小替换即可得到锁相环的小信号传递函数 G_{pll}

$$G_{\text{pll}} = \frac{\Delta\theta}{\Delta v_q} = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \cdot \frac{1}{v_d [s + (k_p + k_i/s)]} \quad (20)$$

3 交流网络建模

交流电网主要由电抗器、换流变压器、滤波器等组成。于是采用宽频建模法来进行建模,即忽略设备内部的复杂结构,将研究的重点放在输入和输出的关系上,基本思路利用电感、电阻器、电容等元件,按照实际电路的结构,建立宽频模型。尽管该模型的精度有一定的局限性,但它具有很好的通用性^[16]。

实际工程中,常用到大量的滤波器,为减少复杂程度,可将相同结构、参数的滤波电路合并为一组滤波电路,用合并后的总的物理量代替分散的物理量。由于换流器并网点交流电压变化并不大,戴维南等效电路适用于分析换流器连接强交流电网时的应用场景^[17],故选择戴维南电路作为交流电网的等值电路,逆变侧交流网络等效电路如图6,其中电阻电感、电容为合并后的交流滤波器组等值参数。

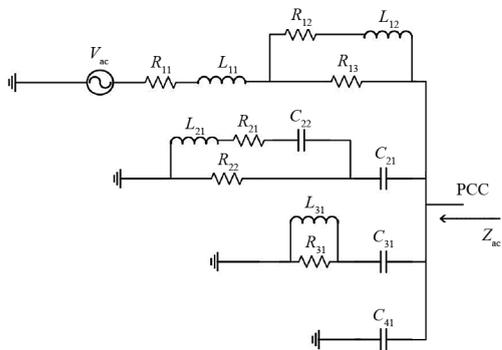


图6 交流网络结构

根据交流电网的等效电路图,可以推出在 abc 坐标系下,交流电网的等效阻抗 Z_{ac} 表达式为

$$\frac{1}{Z_{ac}} = 1/\{R_{13} + sL_{12} + [R_{12} \parallel (sL_{11} + R_{11})]\} + 1/\{1/(sC_{21}) + [R_{22} \parallel (1/C_{22}) + sL_{21} + R_{21}]\} + 1/[1/(sC_{31}) + (R_{31} \parallel sL_{31})] + sC_{41} \quad (21)$$

根据文献[18],可用通用 dq 框架阻抗矩阵来揭示不同域中模型之间的数学关系。将交流网络阻抗转移到 dq 坐标系下,则可以得到公共耦合点(point of common coupling, PCC)电压电流表达为

$$\begin{cases} \Delta v_d = -Z_{acdd} \Delta i_d - Z_{acdq} \Delta i_q \\ \Delta v_q = -Z_{acqd} \Delta i_d - Z_{acqq} \Delta i_q \end{cases} \quad (22)$$

式中: Z_{acdd} 、 Z_{acdq} 为交流网络阻抗 Z_{ac} 的 d 轴电压下阻抗分量; Z_{acqd} 、 Z_{acqq} 为交流网络阻抗 Z_{ac} 的 q 轴电压下阻抗分量。

4 LCC 阻抗建模

4.1 LCC 闭环直流阻抗建模

根据之前的分析,闭环直流阻抗的计算可以由式(18)来求解,式中各变量可由前述方程求解。

$$Z_{dc} = K_{i_{dc}} u_{dc} - \Delta v_d \cdot K_{v_d} u_{dc} - \Delta v_q \cdot K_{v_q} u_{dc} + \Delta \alpha \cdot K_{\alpha} u_{dc} \quad (23)$$

式中: Z_{dc} 为闭环直流阻抗; K 为对应的传递函数, K 的后缀分别代表传递函数对应的输入量和输出量,如 $K_{i_{dc} u_{dc}}$ 表示输入量为直流电流、输出量为直流电压的传递函数。

4.2 LCC 闭环交流阻抗建模

所做研究中, abc 坐标系下的交流量均被转化为 dq 坐标系下的直流量,从而得到 dq 坐标系下的阻抗。为避免 d 轴分量和 q 轴分量之间的相互影响,对交流电压的 d 轴分量和 q 轴分量分开进行了建模。由上述分析可得关于 dq 坐标系的阻抗表达式,由式(24)给出。

$$Z_{dd} = \frac{\Delta v_d}{\Delta i_d}, Z_{dq} = \frac{\Delta v_d}{\Delta i_q}, Z_{qd} = \frac{\Delta v_q}{\Delta i_d}, Z_{qq} = \frac{\Delta v_q}{\Delta i_q} \quad (24)$$

式中: Z_{dd} 、 Z_{dq} 为LCC交流侧阻抗的 d 轴电压下阻抗分量; Z_{qd} 、 Z_{qq} 为LCC交流侧阻抗的 q 轴电压下阻抗分量。

5 仿真验证

为了验证所提模型的准确性,在PSCAD中对该阻抗模型进行了验证,电路参数包括交流网络参数和控制系统参数,如表1、表2所示。

表1 系统参数

参数	值	参数	值
v_{ac}/kV	203.2	L_{31}/mH	0.006 1
R_{11}/Ω	0.740 6	R_{31}/Ω	37.03
L_{11}/mH	36.5	$C_{41}/\mu\text{F}$	7.522
R_{12}/Ω	0.740 6	K_{pp}	10
L_{12}/mH	36.5	K_{pi}	50
R_{13}/Ω	24.81	G	0.001 9
$C_{21}/\mu\text{F}$	15.04	K_{cp}	0.01
$C_{22}/\mu\text{F}$	167.2	K_{ci}	10
L_{21}/mH	60.6	T/s	0.02
R_{21}/Ω	13.23	α/rad	0.473 8
R_{22}/Ω	116.38	i_{dc}/kA	2

表 2 系统变压器参数

参数	值
线电压比/kV	230/209.228 8
容量/MVA	591.79
漏抗/(pu)	0.18

闭环直流阻抗验证结果如图 7,并与使用开关函数法得到的直流阻抗模型进行了比较。

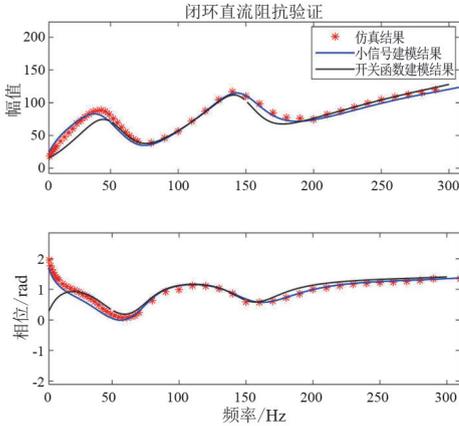


图 7 闭环直流阻抗验证结果

在 0~300 Hz 的频率范围内,换流器闭环直流阻抗的仿真结果和建模计算结果误差不超过 3%,与开关函数建模法相比,精度有了较大提升,确定了阻抗模型的准确性。

在验证交流阻抗时,对交流阻抗在 dq 轴下的导纳进行了验证, Y_{dd} 、 Y_{dq} 为 d 轴电压下导纳分量; Y_{qd} 、 Y_{qq} 为 q 轴电压下导纳分量,此处各项导纳与式(24)给出的阻抗为倒数关系,验证结果如图 8 所示。

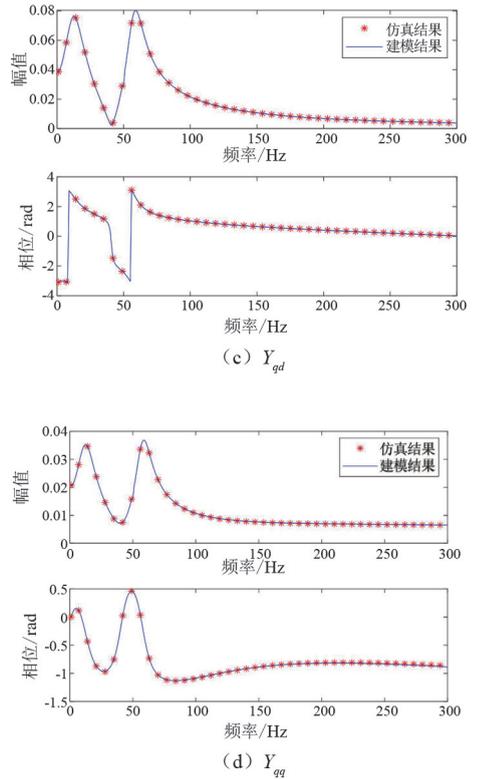
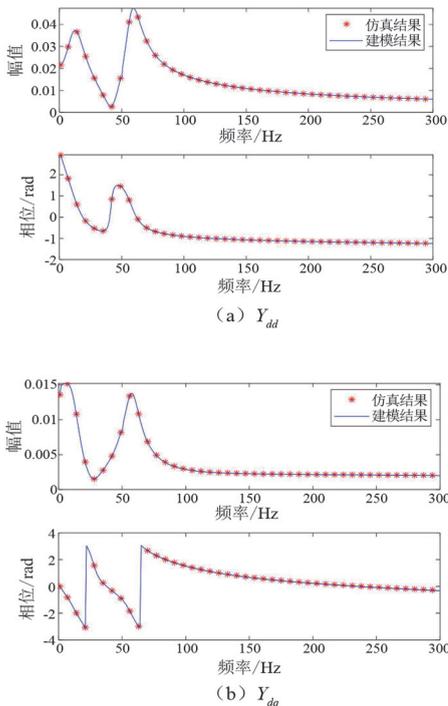


图 8 LCC 交流导纳扫频与等效导纳计算对比

由验证结果可以看出,在 0~300 Hz 的范围内,交流导纳的仿真结果和建模计算结果误差不超过 3%,考虑到建模过程中对模型变压器等部分的简化,以及对换相过程进行了平均化处理的影响,该数值属于阻抗扫描法允许的误差范围内,显示所提模型有较高的准确率。

6 结论

由于换流器换相重叠过程的非线性特性复杂,对其进行建模有较高的难度和较大的工作量,目前少有研究建立了比较完善、准确的换流器模型。上面的研究构建了在 dq 坐标系下的六脉动电网换相换流器的小信号模型,主要结论如下:

1) 对换流器的小信号建模方法进行了研究,验证结果表明在 dq 坐标系下通过平均法来建立传递函数从而完成的小信号模型具有一定的准确性。在 dq 坐标系下的建模有利于模型考虑进锁相环的影响,从而建立电路的闭环模型。

2) 对考虑换相重叠过程的换流器进行了建模,完全考虑非线性换相重叠电流,然后在该平衡点将

(下转第 44 页)

- [7] 杨帆, 曾莼, 阮羚, 等. 中压交联电缆接头复合界面受潮缺陷的诊断方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 1-5.
- [8] 李蓉, 周凯, 万航, 等. 基于频域反射法的 10 kV 配电电缆中间接头受潮定位[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 825-832.
- [9] 徐兴全, 桂媛, 姚玉海, 等. 基于 Nuttall 自卷积窗的 10 kV 配电电缆中间接头定位改进方法[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 26-32.
- [10] OHKI Y T, YAMADA T, HIRAI N. Diagnosis of cable aging by broadband impedance spectroscopy[C]. 2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, 2011:24-27.
- [11] NOROUZI Y, BRAUN S, Frohne C, et al. Effect of cable joints on frequency domain analysis [C]. 2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP), IEEE, 2018:288-292.
- [12] 王子健, 周凯, 朱光亚, 等. 基于时频域转换法的配电网电缆冷缩中间接头受潮诊断[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2178-2186.
- [13] CLAYTON R P. Analysis of Multiconductor Transmission Lines [M]. Hoboken: Wiley, 1994.

作者简介:

李巍巍(1984),女,博士,高级工程师,研究方向为电气设备状态监测评估、电力电缆击穿、老化及故障诊断技术。

(收稿日期:2023-07-12)

(上接第 10 页)

所有非线性状态(包括触发角、换相重叠角、直流侧电流和相电压)线性化,以推导出 LCC 在 dq 坐标系下的阻抗模型,提高了建模的准确性。

参考文献

- [1] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
- [2] 佚名.《能源发展“十三五”规划》介绍(二)[J]. 能源与节能, 2017(7): 1.
- [3] 汤涌, 郭强, 周勤勇, 等. 特高压同步电网安全性论证[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 97-104.
- [4] HAMMAD A E. Analysis of second harmonic instability for the Chateaugay HVDC/SVC scheme [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(1): 410-415.
- [5] 贺永杰, 向往, 赵静波, 等. 一种用于 LCC-HVDC 系统小干扰稳定性分析的改进动态相量模型[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1417-1428.
- [6] PERSSON E V. Calculation of transfer functions in grid-controlled converter systems. With special reference to h.v. d.c. transmissions [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1970, 117(5): 989-997.
- [7] OSAUSKAS C M, HUME D J, WOOD A R. Small signal frequency domain model of an HVDC converter[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(6): 573-578.
- [8] OSAUSKAS C M, WOOD A R. Small-signal dynamic modeling of HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 220-225.
- [9] DETOLEDO P F, ANGAUIST L, NEE H P. Frequency domain model of an HVDC link with a line-commutated current-source converter. Part 1: fixed overlap [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2009, 3(8): 757-770.
- [10] QI Yi, ZHAO Huanfeng, FAN Shengtao, et al. Small signal frequency-domain model of a LCC-HVDC converter based on an infinite series-converter approach [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 95-106.
- [11] 李至峪. 考虑电压动态过程的交直流混合系统小信号建模方法研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [12] 曾靖茹. 电流互感器在线校验系统的信号处理方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [13] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [14] CHEN X, MA J P, WANG S L, et al. An accurate impedance model of line commutated converter with variable commutation overlap [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(1): 562-572.
- [15] 徐龙. 锁相环动态影响交直流系统小干扰稳定性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019
- [16] 宋鹏程. 高压柔性直流换流系统建模方法及传导电磁干扰特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [17] 鲁晓军. 柔性直流电网小信号建模及稳定性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [18] WANG X F, HARNEFORS L, BLAABJERG F. A unified impedance model of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(2): 1775-1787.

作者简介:

张纯(1985),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网控制与保护;

李小鹏(1987),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统保护与控制;

戚清儿(2000),女,硕士研究生,研究方向为电力电子技术;

王顺亮(1987),男,博士,副教授,博士研究生导师,研究方向为直流输电与电力电子。

(收稿日期:2023-08-14)