

采用直接电流控制策略的MMC-UPFC小信号模型

杨健¹, 蔡晖², 宋鹏程³, 彭竹弈², 祁万春², 徐政¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏 南京 210008;
3. 国家电网有限公司 国家电力调度控制中心, 北京 100031)

摘要:基于模块化多电平换流器(MMC)的统一潮流控制器(UPFC)大多采用直接电流控制策略,为分析采用该控制时UPFC接入后系统的小干扰稳定特性,针对一般的3节点拓扑UPFC,推导了其外环控制器、内环控制器、MMC和直流系统的小信号模型,并给出了UPFC输出电流的线性化方程。进一步地推导了传统2节点拓扑UPFC的小信号模型,同时给出了UPFC模型与系统其余部分的组合方法,建立了系统整体的线性化模型。最后,通过对一个2机测试系统进行时域仿真和模态分析,验证了所提小信号模型的正确性。

关键词:统一潮流控制器;模块化多电平换流器;直接电流控制;小信号模型;机电暂态

中图分类号:TM 46

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201909041

0 引言

近年来,统一潮流控制器(UPFC)技术在我国开始受到关注,并在实际工程中逐步得到应用^[1-2]。截至2017年底,世界上已有6套UPFC装置投入运行。其中,国外在1998—2004年间投运了3套基于三电平电压源型换流器的UPFC装置^[3];国内在2015年12月、2017年9月和2017年12月分别投运了1套基于模块化多电平换流器(MMC)的UPFC(MMC-UPFC)装置^[4-6]。

建立UPFC的小信号模型和含UPFC系统整体的线性化模型是分析含UPFC系统小干扰稳定性和低频振荡特性的基础。针对该问题,文献[7-11]对用间接电流控制(或称之为幅相控制)策略的UPFC进行了研究。文献[7-9]给出了含UPFC系统的小信号状态空间模型和Phillips-Heffron模型,并基于上述模型,研究了定有功功率控制器、定直流电压控制器等对系统阻尼特性的影响;文献[10-11]采用了相位补偿法、线性二次型最优控制等方法对UPFC附加阻尼控制器进行了设计。然而,上述研究中所给出的UPFC小信号模型大多将换流器的调制比和输出电压的相角作为输入量,将UPFC的直流电压作为状态变量,仅适用于采用间接电流控制的UPFC。

我国的UPFC工程与早期国外UPFC工程的一个明显区别在于采用了MMC,以满足高电压、大容量输电领域的应用需求。为避免换流阀过流,同时实现有功和无功的解耦控制,MMC-UPFC常采用包含外环控制器和内环电流解耦控制的直接电流控制策略^[12-13]。在采用直接电流控制的MMC-UPFC动态

模型研究方面,文献[14-15]给出了MMC的数学模型,文献[16]给出了采用直接电流控制的UPFC的动态模型。上述研究为建立MMC-UPFC小信号模型提供了基础,然而,现有文献对采用直接电流控制策略的MMC-UPFC小信号模型的研究还很不完善。文献[17]给出了UPFC并联侧采用直接电流控制的UPFC小信号模型,但该模型中UPFC串联侧采用了一种三环控制器。这种控制器结构复杂,且无法实现有功功率和无功功率的解耦控制,在实际工程中较少采用。此外,在南京西环网中应用的UPFC具有3节点拓扑结构,对采用这种拓扑结构的UPFC的相关研究相对较少,并且大多局限于潮流计算和仿真方法研究^[18-19]。实际上,该结构是更具一般性的UPFC结构,传统的2节点拓扑UPFC可以视为该结构的一种特例。因此,本文研究从具有3节点拓扑结构的UPFC出发,推导UPFC的小信号模型,并说明针对2节点拓扑的UPFC所需做的调整。

本文首先介绍MMC-UPFC的等效模型,然后推导采用直接电流控制策略的MMC-UPFC小信号模型,并给出全系统线性化模型的形成方法,最后通过仿真算例对所提模型进行验证。

1 MMC-UPFC的等效模型

UPFC的一般性结构(3节点拓扑结构)如图1所示。UPFC主要包括串联换流器和并联换流器,两者之间通过直流线路连接。串联换流器通过串联变压器

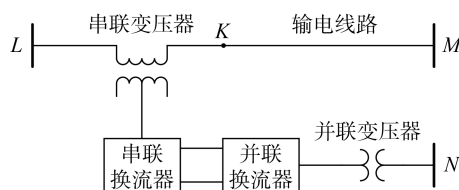


图1 UPFC系统结构图

Fig.1 Structure diagram of UPFC system

收稿日期:2018-12-21;修回日期:2019-07-01

基金项目:国家电网公司科技项目(SGTYHT/15-JS-191)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Cooperation of China(SGTYHT/15-JS-191)

器接于输电线路的母线 L 和结点 K ,并联换流器通过并联变压器接于母线 N 。当母线 N 与母线 L 为同一母线时,UPFC为传统的2节点拓扑结构。

图1所示的UPFC可以用图2中的UPFC对其所连节点 L 、 K 、 N 的注入电流 I_{KL} 、 I_{LK} 和 I_N 进行等效。在动态过程中,UPFC根据控制目标和节点 L 、 K 、 N 的电压,在控制器的作用下调节注入电流,以实现控制线路潮流、提供无功支撑等作用。

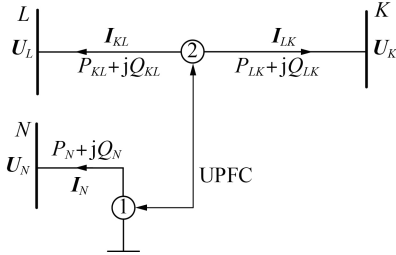


图2 UPFC等效模型

Fig.2 Equivalent model of UPFC

在下文中,UPFC模型内部并联侧的量用下标1表示,串联侧的量用下标2表示,如将节点 N 注入并联侧的电流 d 、 q 轴分量分别表示为 i_{d1} 和 i_{q1} ,线路 L — K 注入串联侧的电流 d 、 q 轴分量分别表示为 i_{d2} 和 i_{q2} 。

2 MMC-UPFC的小信号模型

2.1 外环控制器

对于图1所示的UPFC,其动态模型主要包括控制器模型、MMC模型和直流系统模型三部分,相应地,UPFC的小信号模型也由这三部分组成。对于MMC-UPFC,采用直接电流控制策略时,所采用的控制器包括外环控制器和内环电流解耦控制器。其中,外环控制器的结构如图3和图4所示^[16]。图中,

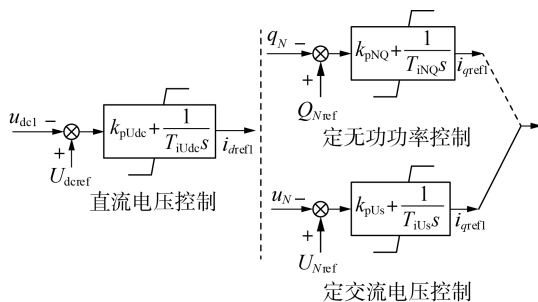


图3 并联侧外环控制器

Fig.3 Outer-loop controller of shunt side

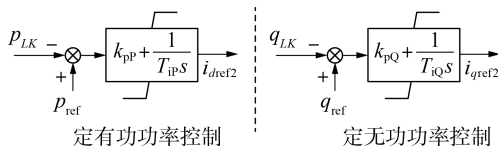


图4 串联侧外环控制器

Fig.4 Outer-loop controller of series side

P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为UPFC串联侧有功功率和无功功率参考值; Q_{Nref} 为UPFC并联侧无功功率参考值; U_{dcref} 、 U_{Nref} 分别为并联侧直流电压和交流电压参考值; i_{dref1} 和 i_{dref2} 、 i_{qref1} 和 i_{qref2} 分别为注入UPFC的 d 、 q 轴电流参考值; u_{dc1} 为并联侧直流电压; k_{pUdc} 、 k_{pNQ} 、 k_{pUs} 、 k_{pP} 、 k_{pQ} 和 T_{iUdc} 、 T_{iNQ} 、 T_{iUs} 、 T_{iP} 、 T_{iQ} 分别为PI控制器的比例系数和积分时间常数。

以UPFC并联侧采用定交流电压控制为例,根据上述控制框图,令:

$$\begin{cases} \frac{dM_{Udc}}{dt} = \frac{1}{T_{iUdc}} (U_{dcref} - u_{dc1}) \\ \frac{dM_{Us}}{dt} = \frac{1}{T_{iUs}} (U_{Nref} - u_N) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dM_P}{dt} = \frac{1}{T_{iP}} (P_{ref} - P_{LK}) \\ \frac{dM_Q}{dt} = \frac{1}{T_{iQ}} (Q_{LK} - Q_{ref}) \end{cases} \quad (2)$$

则有:

$$\begin{cases} i_{dref1} = k_{pUdc} (U_{dcref} - u_{dc1}) + M_{Udc} \\ i_{qref1} = k_{pUs} (U_{Nref} - u_N) + M_{Us} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} i_{dref2} = k_{pP} (P_{ref} - P_{LK}) + M_P \\ i_{qref2} = k_{pQ} (Q_{LK} - Q_{ref}) + M_Q \end{cases} \quad (4)$$

由于各功率量均可以用电流和电压量表示,由式(1)和式(2)可得:

$$\frac{d\Delta \mathbf{x}_M}{dt} = \mathbf{A}_M \Delta \mathbf{u}_{dc1} + \mathbf{B}_{MU} \Delta \mathbf{u}_{dq} + \mathbf{B}_{MI} \Delta \mathbf{i}_{dq} + \mathbf{E}_M \Delta \mathbf{u}_{ref} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{x}_M = [\Delta M_{Udc} \quad \Delta M_{Us} \quad \Delta M_P \quad \Delta M_Q]^T \\ \Delta \mathbf{u}_{dq} = [\Delta u_{Nd} \quad \Delta u_{Nq} \quad \Delta u_{Ld} \quad \Delta u_{Lq} \quad \Delta u_{Kd} \quad \Delta u_{Kq}]^T \\ \Delta \mathbf{i}_{dq} = [\Delta i_{Nd} \quad \Delta i_{Nq} \quad \Delta i_{KLd} \quad \Delta i_{KLq} \quad \Delta i_{LKd} \quad \Delta i_{LKq}]^T \\ \Delta \mathbf{u}_{ref} = [\Delta U_{dcref} \quad \Delta U_{Nref} \quad \Delta P_{ref} \quad \Delta Q_{ref}]^T \end{cases} \quad (6)$$

其中,“ Δ ”表示变化量,后同; $\mathbf{u}_{dq}$ 为 N 、 L 、 K 三点电压 d 、 q 轴分量构成的向量; $\mathbf{i}_{dq}$ 为UPFC对 N 、 L 、 K 三点注入电流的 d 、 q 轴分量构成的向量; $\mathbf{A}_M$ 、 $\mathbf{B}_{MU}$ 、 $\mathbf{B}_{MI}$ 、 $\mathbf{E}_M$ 的表达式见附录A。

由于UPFC的运行状态只与其所连母线的电压和控制器有关,因此UPFC各部分的小信号模型都可以用UPFC状态变量、所连母线电压、注入电流和控制量的偏差进行表示。

2.2 内环控制器和MMC模型

采用内环电流解耦控制时,UPFC串联侧(或并联侧)的内环控制器与MMC模型一起构成 dq 轴电流闭环控制^[14],其整体控制框图如图5所示。图中, $G(s) = 1/(R_{equ} + L_{equ}s)$, R_{equ} 为换流器等效电阻, L_{equ} 为换

流电感与桥臂等效电感之和; i_d 、 i_q 分别为注入 UPFC 的 d 、 q 轴电流实际值; k_{pd} 、 k_{pi} 和 k_{id} 、 k_{iq} 分别为内环电流控制器的比例系数和积分时间常数的倒数。图 5 对 UPFC 并联侧和串联侧都适用。

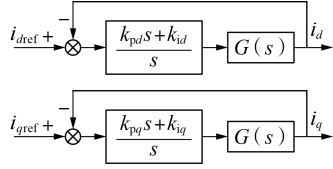


图 5 电流闭环控制框图

Fig.5 Closed-loop control block diagram of current

内环电流控制使注入 MMC 的电流 (i_d 、 i_q) 快速跟踪外环控制器生成的电流参考值 (i_{dref} 、 i_{qref})。由于内环电流控制的响应速度明显快于外环控制^[14], 在机电暂态分析中可以认为内环电流的跟踪过程是瞬时完成的。因此, 为简化分析, 本文认为内环电流控制是理想的, 即有如下假设:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} \quad (7)$$

此时, 有:

$$\Delta i_{dqref} = \begin{bmatrix} \Delta i_{dref1} & \Delta i_{qref1} & \Delta i_{dref2} & \Delta i_{qref2} & -\Delta i_{dref2} & -\Delta i_{qref2} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \Delta i_{d1} & \Delta i_{q1} & \Delta i_{d2} & \Delta i_{q2} & -\Delta i_{d2} & -\Delta i_{q2} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

采用图 2 所示的电流参考方向时, 有:

$$\Delta i_{dqref} = -\Delta i_{dq} \quad (9)$$

2.3 直流系统

直流系统等效电路如图 6 所示。图中, p_{dc1} 、 p_{dc2} 分别为 UPFC 并联侧和串联侧注入直流系统的有功功率; C_{dc1} 和 C_{dc2} 分别为并联侧和串联侧换流器的等效电容; R_{dc} 和 L_{dc} 分别为直流电阻和电感。

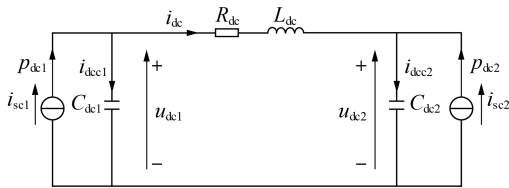


图 6 UPFC 直流系统等效电路

Fig.6 Equivalent circuit of DC system for UPFC

由图 6 可得直流系统动态模型如下:

$$\begin{cases} C_{dc1} \frac{du_{dc1}}{dt} = i_{dc1} = \frac{p_{dc1}}{u_{dc1}} - i_{dc} \\ C_{dc2} \frac{du_{dc2}}{dt} = i_{dc2} = \frac{p_{dc2}}{u_{dc2}} + i_{dc} \\ L_{dc} \frac{di_{dc}}{dt} = u_{dc1} - u_{dc2} - i_{dc} R_{dc} \end{cases} \quad (10)$$

在忽略换流器损耗的情况下, p_{dc1} 、 p_{dc2} 与交流系统注入 UPFC 并联侧和串联侧的有功功率相等, 从而也可以用交流电压和电流量进行表示。由式(10)

可得 UPFC 直流系统的小信号模型为:

$$\frac{d\Delta \mathbf{x}_{DC}}{dt} = \mathbf{A}_{DC} \Delta \mathbf{x}_{DC} + \mathbf{B}_{DCU} \Delta \mathbf{u}_{dq} + \mathbf{B}_{DCI} \Delta \mathbf{i}_{dc} \quad (11)$$

$$\Delta \mathbf{x}_{DC} = \begin{bmatrix} \Delta u_{dc1} & \Delta u_{dc2} & \Delta i_{dc} \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

其中, $\mathbf{A}_{DC}$ 、 $\mathbf{B}_{DCU}$ 、 $\mathbf{B}_{DCI}$ 的表达式见附录 B。

2.4 坐标变换

综上所述, 若令:

$$\Delta \mathbf{x}_{UPFC} = \begin{bmatrix} \Delta u_{dc1} & \Delta u_{dc2} & \Delta i_{dc} & \Delta M_{Udc} & \Delta M_{Us} & \Delta M_p & \Delta M_Q \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

则由式(5)和式(11)可得:

$$\frac{d\Delta \mathbf{x}_{UPFC}}{dt} = \bar{\mathbf{A}}_C \Delta \mathbf{x}_{UPFC} + \bar{\mathbf{B}}_{CU} \Delta \mathbf{u}_{dq} + \bar{\mathbf{B}}_{CI} \Delta \mathbf{i}_{dq} + \bar{\mathbf{E}}_C \Delta \mathbf{u}_{ref} \quad (14)$$

其中, $\bar{\mathbf{A}}_C$ 、 $\bar{\mathbf{B}}_{CU}$ 、 $\bar{\mathbf{B}}_{CI}$ 和 $\bar{\mathbf{E}}_C$ 的表达式见附录 C。

同时, 由式(3)、式(4)和式(9)可得 UPFC 输出电流的变化量为:

$$\Delta \mathbf{i}_{dq} = -\Delta \mathbf{i}_{dqref} = \bar{\mathbf{P}}_C \Delta \mathbf{x}_{UPFC} + \bar{\mathbf{Y}}_C \Delta \mathbf{u}_{dq} + \bar{\mathbf{F}}_C \Delta \mathbf{u}_{ref} \quad (15)$$

其中, $\bar{\mathbf{P}}_C$ 、 $\bar{\mathbf{Y}}_C$ 和 $\bar{\mathbf{F}}_C$ 的表达式见附录 C。

式(14)和式(15)中 $\Delta \mathbf{u}_{dq}$ 和 $\Delta \mathbf{i}_{dq}$ 为 dq 坐标系下的量, 为与系统其余部分构成系统整体的线性化模型, 需要将上述变量转换到 xy 坐标系下。 xy 坐标系到 dq 坐标系之间的变换矩阵为:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{dq} &= \mathbf{T} \mathbf{A}_{xy} \\ \mathbf{T} &= \begin{bmatrix} \sin \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

小扰动下, 有:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{A}_{dq} &= \begin{bmatrix} \sin \delta_0 & -\cos \delta_0 \\ \cos \delta_0 & \sin \delta_0 \end{bmatrix} \Delta \mathbf{A}_{xy} + \begin{bmatrix} \cos \delta_0 & \sin \delta_0 \\ -\sin \delta_0 & \cos \delta_0 \end{bmatrix} \mathbf{A}_{xy,0} \Delta \delta = \\ &= \mathbf{T}_0 \Delta \mathbf{A}_{xy} + \mathbf{T}_{T0} \mathbf{A}_{xy,0} \Delta \delta \end{aligned} \quad (17)$$

其中, 下标 0 表示初始值, 如 δ_0 为 δ 的初始值, $\mathbf{A}_{xy,0}$ 为 $\mathbf{A}_{xy}$ 的初始值; $\mathbf{T}_{T0}$ 为坐标变换矩阵 $\mathbf{T}$ 在初始点处对 δ 的导数。

对于并联侧, 取 $\delta = \delta_1 = \theta_N + \pi/2$, 并将坐标变换矩阵记为 $\mathbf{T}_1$, $\mathbf{T}_1$ 对 δ 的导数记为 $\mathbf{T}_{T1}$; 对于串联侧, 取 $\delta = \delta_2 = \theta_K + \pi/2$, 并将坐标变换矩阵记为 $\mathbf{T}_2$, $\mathbf{T}_2$ 对 δ 的导数记为 $\mathbf{T}_{T2}$ 。其中, θ_N 和 θ_K 分别为节点 N 和节点 K 电压的相角。

若令:

$$\begin{cases} \mathbf{T}_u = \mathbf{T}_i = \text{diag}(\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \mathbf{T}_2) \\ \mathbf{T}_{uT} = \mathbf{T}_{iT} = \text{diag}(\mathbf{T}_{T1}, \mathbf{T}_{T2}, \mathbf{T}_{T2}) \end{cases} \quad (18)$$

并设 $\mathbf{T}_{u,0}$ 、 $\mathbf{T}_{i,0}$ 、 $\mathbf{T}_{uT,0}$ 和 $\mathbf{T}_{iT,0}$ 分别为 $\mathbf{T}_u$ 、 $\mathbf{T}_i$ 、 $\mathbf{T}_{uT}$ 和 $\mathbf{T}_{iT}$ 的初值, 则在忽略锁相环的条件下, 有:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{u}_{dq} = \mathbf{T}_{u,0} \Delta \mathbf{u}_{xy} + \mathbf{T}_{uT,0} \Delta \mathbf{u}_{xy,0} \Delta \delta \\ \Delta \mathbf{i}_{dq} = \mathbf{T}_{i,0} \Delta \mathbf{i}_{xy} + \mathbf{T}_{iT,0} \Delta \mathbf{i}_{xy,0} \Delta \delta \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{u}_{xy} = \begin{bmatrix} \Delta u_{Nx} & \Delta u_{Ny} & \Delta u_{Lx} & \Delta u_{Ly} & \Delta u_{Kx} & \Delta u_{Ky} \end{bmatrix}^T \\ \Delta \mathbf{i}_{xy} = \begin{bmatrix} \Delta i_{Nx} & \Delta i_{Ny} & \Delta i_{KLx} & \Delta i_{KLy} & \Delta i_{LKx} & \Delta i_{LY} \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \Delta u_{xy,0} = \\ \text{diag}(\Delta u_{Nx,0}, \Delta u_{Ny,0}, \Delta u_{Lx,0}, \Delta u_{Ly,0}, \Delta u_{Kx,0}, \Delta u_{Ky,0}) \\ \Delta i_{xy,0} = \\ \text{diag}(\Delta i_{Nx,0}, \Delta i_{Ny,0}, \Delta i_{KLx,0}, \Delta i_{KLy,0}, \Delta i_{LKx,0}, \Delta i_{LKy,0}) \end{cases} \quad (21)$$

$$\Delta \delta = [\Delta \delta_1 \Delta \delta_1 \Delta \delta_2 \Delta \delta_2 \Delta \delta_2 \Delta \delta_2]^T = [\Delta \theta_N \Delta \theta_N \Delta \theta_K \Delta \theta_K \Delta \theta_K \Delta \theta_K]^T \quad (22)$$

根据电压相角与电压在 xy 坐标系下分量之间的关系,可得:

$$\Delta \delta = T_\theta \Delta u_{xy} \quad (23)$$

其中, T_θ 的表达式见附录 C。

利用式(23),可将式(19)表示为:

$$\begin{cases} \Delta u_{dq} = (T_{u,0} + T_{uT,0} \Delta u_{xy,0} T_\theta) \Delta u_{xy} \\ \Delta i_{dq} = T_{i,0} \Delta i_{xy} + T_{iT,0} \Delta i_{xy,0} T_\theta \Delta u_{xy} \end{cases} \quad (24)$$

根据式(15)和式(24)可得 xy 坐标下 UPFC 对其所连母线的注入电流变化量为:

$$\Delta i_{xy} = T_{i,0}^{-1} (\bar{P}_C \Delta x_{UPFC} + \bar{G}_C \Delta u_{xy} + \bar{F}_C \Delta u_{ref}) \quad (25)$$

其中, $\bar{G}_C$ 的表达式见附录 C。

根据式(14)、式(24)和式(25)可得 xy 坐标系下 UPFC 的小信号模型为:

$$\frac{d\Delta x_{UPFC}}{dt} = (\bar{A}_C + \bar{B}_{Cl} \bar{P}_C) \Delta x_{UPFC} + \bar{H}_C \Delta u_{xy} + (\bar{E}_C + \bar{B}_{Cl} \bar{F}_C) \Delta u_{ref} \quad (26)$$

其中, $\bar{H}_C$ 的表达式见附录 C。

2.5 2节点拓扑的 UPFC 的小信号模型

式(25)和式(26)分别给出 3 节点拓扑的 UPFC 对所连母线注入电流的线性化方程和 UPFC 的小信号模型。对于传统的 2 节点拓扑的 UPFC (即对应图 1 中母线 L 与母线 N 为同一母线的情况),需要重新计算 UPFC 对母线 L (或母线 N) 的注入电流。而实际上,2 节点拓扑的 UPFC 对母线 L (或母线 N) 的注入电流可视为 3 节点拓扑的 UPFC 对母线 L 和母线 N 的注入电流之和。同时,由于对于 2 节点拓扑的 UPFC,母线 L 的电流、电压量和母线 N 是相同的,在 UPFC 小信号模型中应对应项进行合并。在式(25)和式(26)的基础上进行一些调整,可使其适用于 2 节点拓扑的 UPFC。

根据各电流量和电压量之间的关系可知:

$$\begin{cases} \Delta i_{xy2} = T_{i23} \Delta i_{xy} \\ \Delta u_{xy} = T_{u32} \Delta u_{xy2} \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} \Delta i_{xy2} = [\Delta i_{Nx} + \Delta i_{KLx} \Delta i_{Ny} + \Delta i_{KLy} \Delta i_{LKx} \Delta i_{LKy}]^T \\ \Delta u_{xy2} = [\Delta u_{Nx} \Delta u_{Ny} \Delta u_{Kx} \Delta u_{Ky}]^T \end{cases} \quad (28)$$

其中, T_{i23} 、 T_{u32} 的表达式见附录 D。

根据式(25)和式(27)可得:

$$\Delta i_{xy2} = T_{i23} T_{i,0}^{-1} (\bar{P}_C \Delta x_{UPFC} + \bar{G}_C \Delta u_{xy} + \bar{F}_C \Delta u_{ref}) \quad (29)$$

根据式(26)和式(27)可得:

$$\frac{d\Delta x_{UPFC}}{dt} = (\bar{A}_C + \bar{B}_{Cl} \bar{P}_C) \Delta x_{UPFC} + \bar{H}_C T_{u32} \Delta u_{xy2} + (\bar{E}_C + \bar{B}_{Cl} \bar{F}_C) \Delta u_{ref} \quad (30)$$

式(25)和式(29)可统一记为:

$$\Delta i_{UPFC} = G_C \Delta x_{UPFC} + D_C \Delta u_{UPFC} + F_C \Delta u_{ref} \quad (31)$$

式(26)和式(30)可统一记为:

$$\frac{d\Delta x_{UPFC}}{dt} = A_C \Delta x_{UPFC} + B_C \Delta u_{UPFC} + E_C \Delta u_{ref} \quad (32)$$

式(31)和式(32)一般性地给出了 UPFC 输出电流的线性化方程和 UPFC 小信号模型,利用其可以形成含 UPFC 系统的整体线性化模型。

3 含 UPFC 系统的整体线性化模型

设包含 UPFC 的电力系统除 UPFC 外有 n 个动态元件,可以写出这 n 个动态元件的线性化方程和输出电流的线性化方程如下^[20]:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta x_D}{dt} = A_D \Delta x_D + B_D \Delta u_D \\ \Delta i_D = C_D \Delta x_D + D_D \Delta u_D \end{cases} \quad (33)$$

其中, x_D 为 n 个动态元件的状态变量组成的列向量; u_D 和 i_D 分别为 n 个动态元件的端电压和注入电流组成的列向量。

在形成节点导纳矩阵时,将这 n 个动态元件所连节点优先编号,然后对 UPFC 所连节点按照 N 、 (L) 、 K 顺序依次编号,最后对其余节点进行编号,则网络方程可以写成如式(34)所示的分块结构。

$$\begin{bmatrix} \Delta i_D \\ \Delta i_{UPFC} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{DD} & Y_{DC} & Y_{DL} \\ Y_{CD} & Y_{CC} & Y_{CL} \\ Y_{LD} & Y_{LC} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_D \\ \Delta u_{UPFC} \\ \Delta u_0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

其中, u_0 为其余节点电压组成的向量。

根据式(31)和式(33)消去式(34)中的 Δi_D 和 Δi_{UPFC} 可得:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_D & 0 \\ 0 & -C_C \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_D \\ \Delta x_{UPFC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{DD} - D_D & Y_{DC} & Y_{DL} \\ Y_{CD} & Y_{CC} - D_C & Y_{CL} \\ Y_{LD} & Y_{LC} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_D \\ \Delta u_{UPFC} \\ \Delta u_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ F_C \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u_{ref} \quad (35)$$

此时,根据式(32)、式(33)和式(35)有:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Delta x}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{A} & \tilde{B} \\ \tilde{C} & \tilde{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{E}_C \\ -\tilde{F}_C \end{bmatrix} \Delta u_{ref} \quad (36)$$

其中, $\Delta x = [\Delta x_D \Delta x_{UPFC}]^T$; $\Delta y = [\Delta u_D \Delta u_{UPFC} \Delta u_0]^T$; $\tilde{A}$ 、 $\tilde{B}$ 、 $\tilde{C}$ 、 $\tilde{D}$ 、 $\tilde{E}_C$ 、 $\tilde{F}_C$ 的表达式见附录 E。

根据式(36)可知,系统的状态矩阵为:

$$A = \tilde{A} - \tilde{B} \tilde{D}^{-1} \tilde{C} \quad (37)$$

利用矩阵 A 可分析系统的小干扰稳定特性。

4 算例分析

4.1 测试系统介绍

为完整验证上述 UPFC 小信号模型的正确性,选取含 2 节点拓扑的 UPFC 的测试系统进行分析。测试系统结构及稳态潮流结果如图 7 所示。图中,母线上数字为母线编号;线路上方数字为流过线路的有功功率,单位为 MW,方向如箭头所示。

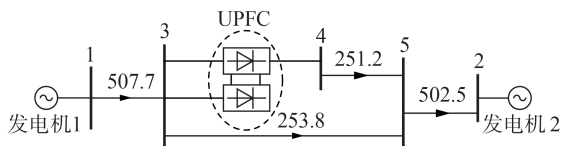


图 7 测试系统结构图

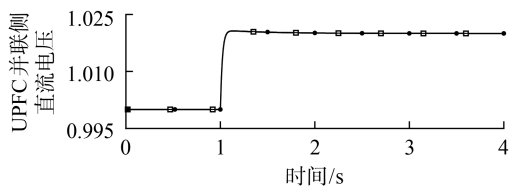
Fig.7 Structure diagram of test system

系统中包含 2 台容量为 $900 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 的发电机,其动态模型采用经典模型。UPFC 的串联侧接入线路 3-4 中,并联侧接在母线 3 上。系统容量的基准值为 $100 \text{ MV}\cdot\text{A}$,电压基准值为 230 kV 。UPFC 串联侧和并联侧的换流器等效电容均为 $2000 \mu\text{F}$ 。直流额定电压为 100 kV ,直流电阻为 0.02Ω ,电感为 0.2 mH 。其余参数见附录 F 中表 F1—F3。

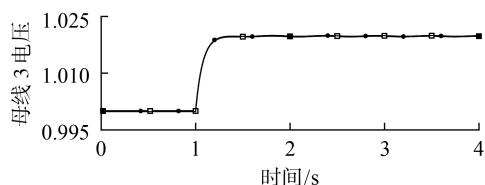
稳态时,UPFC 串联侧控制其注入母线 4 的潮流为 $251.2 \text{ MW} + j13.4 \text{ Mvar}$,并联侧控制母线 3 的交流电压和并联侧直流电压均为 1 p.u. 。

4.2 阶跃响应对比

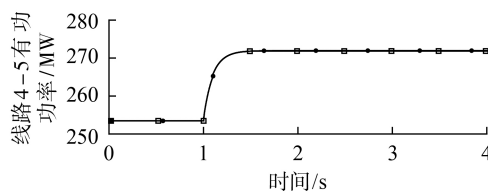
根据式 (31) 和式 (32),代入测试系统参数,建立 UPFC 的小信号模型。然后,采用第 3 节所述方法在 MATLAB 中建立整个系统的小信号模型。为验证模型的正确性,分别采用 PSS / E 时域仿真和 MATLAB 小信号模型计算系统的阶跃响应。仿真过程中在 $t=1 \text{ s}$ 时分别设置直流电压参考值阶跃 0.02 p.u. 、交流母线电压参考值阶跃 0.02 p.u. 、UPFC 有功功率参考值阶跃 0.2 p.u. 、UPFC 无功功率参考值阶跃 0.2 p.u. 。4 种情况下时域仿真结果与小信号模型计算结果对比见图 8。图中,电压为标么值。由图 8 可见,通过所建立的小信号模型计算得到的阶跃响应曲线均与



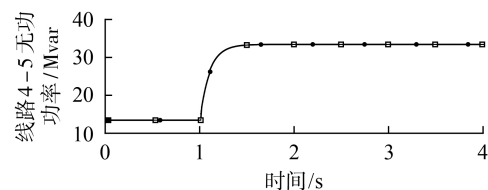
(a) 直流电压



(b) 交流电压



(c) 有功功率



(d) 无功功率

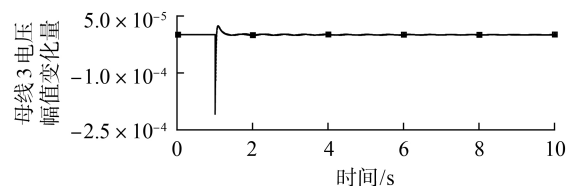
—时域仿真,---小信号模型

图 8 时域仿真和小信号模型的阶跃响应对比

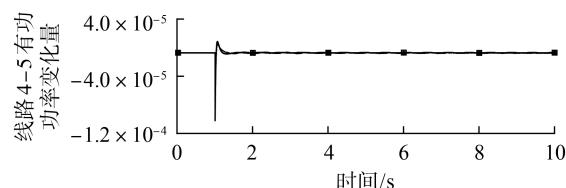
Fig.8 Comparison of step responses between time-domain simulation and small-signal model

时域仿真结果相吻合,验证了小信号模型的正确性。

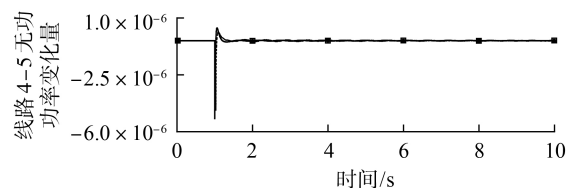
进一步地,当直流电压阶跃 0.02 p.u. 时,并联侧交流母线电压、串联侧线路有功功率和无功功率的变化情况对比如图 9 所示。图中纵坐标均为标么值。可见,当某一控制量阶跃变化时,采用小信号模型计算得到的 UPFC 其余控制量的变化也与时域仿真结果基本一致,进一步验证了小信号模型的正确性。



(a) 交流母线电压变化量



(b) 串联侧线路有功功率变化量



(c) 串联侧线路无功功率变化量

—时域仿真,---小信号模型

图 9 时域仿真和小信号模型的直流电压阶跃响应对比

Fig.9 Comparison of DC voltage step responses between time-domain simulation and small-signal model

4.3 模态分析

建立系统的小信号模型后,采用QR法可以求得系统的特征值,结果如表1所示。

表1 测试系统的特征值
Table 1 Eigenvalues of test system

序号	特征值	阻尼比/%	频率/Hz	参与因子最大的状态变量
1	$-75.20 + j3.162$	2.372	503.2	i_{dc}
2	$-75.20 - j3.162$	2.372	503.2	i_{dc}
3	-47.83	100	0	u_{dc1}, u_{dc2}
4	$-0.1349 + j11.29$	1.194	1.797	$\delta_1, \delta_2, \omega_1, \omega_2$
5	$-0.1349 - j11.29$	1.194	1.797	$\delta_1, \delta_2, \omega_1, \omega_2$
6	-13.52	100	0	M_{Us}
7	-9.634	100	0	M_P
8	-9.210	100	0	M_Q
9	-2.0868	100	0	M_{Udc}
10	2.23×10^{-5}	-100	0	δ_1, δ_2
11	-0.3524	100	0	ω_1, ω_2

由于发电机转子的角度不是唯一的,系统中存在一个冗余的转子角度,因此表1中存在一个零特征值(即第10个特征值)。除该特征值外,其余特征值实部均为负,表明该系统是小干扰稳定的。此外,根据参与因子情况可知,表1中第4、5和11个特征值对应的是系统的机电振荡模式,其余特征值对应的是UPFC的振荡模式。因此,测试系统机电振荡的主导特征值为 $-0.1349 \pm j11.29$,机电振荡模式的阻尼比为1.194%,振荡频率为1.797 Hz。在PSS/E中对系统进行时域仿真,仿真过程为系统稳态运行1 s后,在母线5上增加10 MW负荷,UPFC的控制方式不变。通过仿真得到2台发电机之间的相对摇摆角变化曲线如图10所示。

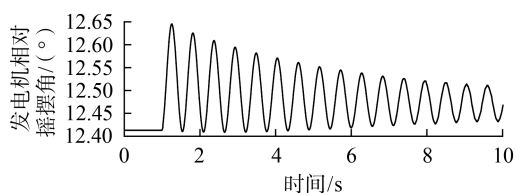
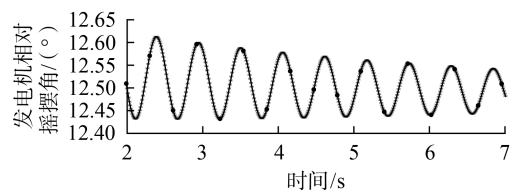


图10 发电机相对摇摆角曲线

Fig.10 Relative swing angle curve of generators

采用Prony法对上述曲线进行拟合,得到的结果如图11所示。采用Prony法得到的系统特征值为 $-0.1341 \pm j11.2918$,阻尼比为1.182%,振荡频率为



* 采样值, — 拟合值

图11 Prony法拟合结果

Fig.11 Fitting results of Prony method

1.797 Hz。这与采用小信号模型分析得到的结果基本一致,进一步验证了上述系统小信号模型的正确性。

5 结论

MMC-UPFC常采用直接电流控制策略,本文针对采用直接电流控制策略的MMC-UPFC,依次推导了具有3节点拓扑结构和传统2节点拓扑结构的MMC-UPFC小信号模型,并给出了其一般性的表示方法。利用该方法,可以方便地将UPFC与系统其余部分结合,从而形成整个系统的线性化模型。通过对含UPFC的2机系统的功率阶跃响应测试和模态分析,验证了所建立的小信号模型的正确性。

采用提出的系统整体小信号模型的建模方法,可以对含UPFC的电力系统进行模态分析,研究系统的低频振荡特性和小干扰稳定性。本文在建立MMC-UPFC小信号模型时,考虑了外环控制器的小信号模型,因此可用于分析控制器参数对系统低频振荡特性的影响,进行控制器参数的选择和优化。

在本文研究的基础上,可以进一步研究利用UPFC抑制系统低频振荡的方法,研究附加阻尼控制器控制通道和控制信号的选取以及参数整定的方法等。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李兴建, 笃峻, 姚婷婷, 等. UPFC换流阀模块测试装置的研制及应用[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 212-217.
LI Xingjian, DU Jun, YAO Tingting, et al. Research and application of sub-module test device for UPFC converter valve [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 212-217.
- [2] 李生虎, 汪婷, 吴东, 等. 基于初值估算和潮流可控范围的UPFC潮流收敛特性研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 67-72.
LI Shenghu, WANG Ting, WU Dong, et al. Power flow convergence characteristic of UPFC based on initial value evaluation and controllable range of power flow [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 67-72.
- [3] 宋洁莹, 冯献强, 崔福博, 等. MMC-UPFC动态建模及内部特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(增刊1): 67-75.
SONG Jieying, FENG Xianqiang, CUI Fubo, et al. Dynamic modeling and internal characteristic simulation research of MMC-UPFC [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(Supplement 1): 67-75.
- [4] 刘纲, 蔡晖, 祁万春, 等. 500 kV统一潮流控制器在苏州南部电网的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(6): 119-124.
LIU Gang, CAI Hui, QI Wanchun, et al. Study on application of 500 kV unified power flow controller at southern power system of Suzhou [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6): 119-124.
- [5] 万军. UPFC, 推动电网智能化发展[N/OL]. 国家电网报. (2018-01-30) [2018-12-21]. http://210.77.180.158/html/2018-01/30/content_436629.htm.
- [6] 蔡晖, 祁万春, 黄俊辉, 等. 统一潮流控制器在南京西环网的应

- 用[J]. 电力建设,2015,36(8):73-78.
- CAI Hui, QI Wanchun, HUANG Junhui, et al. Application of UPFC in Nanjing western power system[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(8): 73-78.
- [7] WANG H F. A unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations. III. unified power flow controller[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(3): 978-983.
- [8] TAMBEY N, KOTHARI M L. Damping of power system oscillations with Unified Power Flow Controller(UPFC)[J]. IEE Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(2): 129-140.
- [9] 黄方能, 黄成军, 陈陈, 等. UPFC稳定控制器的研究及应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 101-105.
- HUANG Fangneng, HUANG Chengjun, CHEN Chen, et al. Study and application of UPFC stabilizer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 101-105.
- [10] 任必兴, 杜文娟, 王海风, 等. 基于阻尼转矩分析法的UPFC阻尼通道选取与附加稳定器的协调设计[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 61-67.
- REN Bixing, DU Wenjuan, WANG Haifeng, et al. Damping channel selection based on damping torque analysis and coordinated design of auxiliary stabilizer for UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 61-67.
- [11] PANDEY K, SINGH N K. Small signal model for analysis and design of FACTS controllers[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting 2009(PES'09). Calgary, AB, Canada: IEEE, 2009: 1-8.
- [12] 周飞, 陆振纲, 于弘洋, 等. 统一潮流控制器多时间尺度混合实时数字仿真[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2848-2855.
- ZHOU Fei, LU Zhengang, YU Hongyang. Research on multiple time scale hybrid real-time digital simulation and testing of unified power flow controller[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2848-2855.
- [13] YE X, CHEN C, LI H, et al. Modeling and simulation of unified power flow controller based on modular multilevel converters[C]//43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2017). Beijing, China: IEEE, 2017: 4967-4971.
- [14] 徐政, 肖晃庆, 张哲任, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 106-114.
- [15] LIU S, XU Z, HUA W, et al. Electromechanical transient modeling of modular multilevel converter based multi-terminal HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 72-83.
- [16] 国网江苏省电力公司. 统一潮流控制器工程实践: 南京西环网统一潮流控制器示范工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 46-48.
- [17] 刘永江. UPFC控制策略研究及对电力系统的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- LIU Yongjiang. Control strategy research of UPFC and influence caused by UPFC installed in power system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [18] 杨健, 宋鹏程, 徐政. 适用于新型UPFC拓扑的电力系统潮流计算方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 888-894.
- YANG Jian, SONG Pengcheng, XU Zheng. A load flow calculation method for power systems with novel UPFC topology[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 888-894.
- [19] 王海潜, 祁万春, 乔黎伟, 等. UPFC三节点功率注入模型及其工程应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 145-151.
- WANG Haiqian, QI Wanchun, QIAO Liwei, et al. A three-bus power injection method of UPFC and its engineering application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 145-151.
- [20] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 379-382.

作者简介:



杨健(1992—),男,辽宁锦州人,博士研究生,主要研究方向为大规模交直流电力系统分析(E-mail: yangjian_zju@zju.edu.cn);

蔡晖(1984—),男,江苏盐城人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统规划技术;

徐政(1962—),男,浙江海宁人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、风力发电技术与风电场并网技术(E-mail: xuzheng007@zju.edu.cn)。

Small-signal model of MMC-UPFC with direct current control strategy

YANG Jian¹, CAI Hui², SONG Pengcheng³, PENG Zhu¹, QI Wanchun², XU Zheng¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Economic Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, China;

3. National Electric Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: UPFC (Unified Power Flow Controller) based on MMC (Modular Multilevel Converter) usually employs direct current control strategy. To analyze the small-signal stability characteristics of the power system connected with direct current controlled MMC-UPFC, in view of the general three-node topology UPFC, the small-signal models of its outer-loop controller, inner-loop controller, MMC and DC system are derived. The linearized formulation of UPFC output current is also deduced. Subsequently, the small-signal model of the traditional two-node topology UPFC is built, meanwhile, the approach to combine the UPFC model with the rest of the system is illustrated and the linearized model of the entire system is established. Finally, the effectiveness of the proposed small-signal model is verified by time-domain simulation and modal analysis based on a two-generator test system.

Key words: UPFC; MMC; direct current control; small-signal model; electromechanical transient

附录

附录 A: 外环控制器

A_M 、 B_{MU} 、 B_{MI} 、 E_M 的表达式如下:

$$A_M = [-1/T_{iUdc} \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$B_{MU} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{T_{iUs}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{I_{d2,0}}{T_{iP}} & -\frac{I_{q2,0}}{T_{iP}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{I_{q2,0}}{T_{iQ}} & \frac{I_{d2,0}}{T_{iQ}} \end{bmatrix}$$

$$B_{MI} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{U_{Kd,0}}{T_{iP}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{U_{Kd,0}}{T_{iQ}} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E_M = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{iUdc}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{iUs}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{iP}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{iQ}} \end{bmatrix}$$

根据 2.4 节中 dq 坐标轴的选取方式, u_{Nq} 和 u_{Kq} 的初始值为 0, 在上面的表达式中已直接约去。

附录 B: 直流系统

A_{DC} 、 B_{DCU} 、 B_{DCI} 表达式如下:

$$A_{DC} = \begin{bmatrix} -\frac{u_{Nd,0}i_{d1,0}}{C_{dc1}u_{dc1,0}^2} & 0 & -\frac{1}{C_{dc1}} \\ 0 & \frac{u_{KLd,0}i_{d2,0} + u_{KLq,0}i_{q2,0}}{C_{dc2}u_{dc2,0}^2} & \frac{1}{C_{dc2}} \\ \frac{1}{L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} & -\frac{R_{dc}}{L_{dc}} \end{bmatrix}$$

$$B_{DCU} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{i_{d1,0}}{C_{dc1}u_{dc1,0}} & \frac{i_{q1,0}}{C_{dc1}u_{dc1,0}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{i_{d2,0}}{C_{dc2}u_{dc2,0}} & \frac{i_{q2,0}}{C_{dc2}u_{dc2,0}} & \frac{-i_{d2,0}}{C_{dc2}u_{dc2,0}} & \frac{-i_{q2,0}}{C_{dc2}u_{dc2,0}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{DCI} =$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{u_{Nd,0}}{C_{dc1}u_{dc1,0}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{u_{KLd,0}}{C_{dc2}u_{dc2,0}} & \frac{u_{KLq,0}}{C_{dc2}u_{dc2,0}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

附录 C: 坐标变换

式 (14) 中, 有:

$$\bar{A}_C = \begin{bmatrix} -\frac{u_{Nd,0}i_{d1,0}}{C_{dc1}u_{dc1,0}^2} & 0 & -\frac{1}{C_{dc1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{u_{KLd,0}i_{d2,0} + u_{KLq,0}i_{q2,0}}{C_{dc2}u_{dc2,0}^2} & \frac{1}{C_{dc2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} & -\frac{R_{dc}}{L_{dc}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{T_{iUdc}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{B}_{CU} = \begin{bmatrix} \frac{i_{d1,0}}{C_{dc1}u_{dc1,0}} & \frac{i_{q1,0}}{C_{dc1}u_{dc1,0}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{i_{d2,0}}{C_{dc2}u_{dc2,0}} & \frac{i_{q2,0}}{C_{dc2}u_{dc2,0}} & \frac{-i_{d2,0}}{C_{dc2}u_{dc2,0}} & \frac{-i_{q2,0}}{C_{dc2}u_{dc2,0}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{T_{iUs}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{I_{d2,0}}{T_{iP}} & -\frac{I_{q2,0}}{T_{iP}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{I_{q2,0}}{T_{iQ}} & \frac{I_{d2,0}}{T_{iQ}} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{B}}_{\text{CI}} = \begin{bmatrix} -\frac{u_{Nd,0}}{C_{\text{dc1}}u_{\text{dc1},0}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{u_{KLd,0}}{C_{\text{dc2}}u_{\text{dc2},0}} & \frac{u_{KLq,0}}{C_{\text{dc2}}u_{\text{dc2},0}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{U_{Kd,0}}{T_{\text{iP}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{U_{Kd,0}}{T_{\text{iQ}}} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{E}}_{\text{C}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{\text{iUdc}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{\text{iUs}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{\text{iP}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{\text{iQ}}} \end{bmatrix}$$

式 (15) 中, 令:

$$\mathbf{K}_{\text{C}} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{\text{pP}}U_{Kd,0} - 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_{\text{pQ}}U_{Kd,0} - 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{\text{pP}}U_{Kd,0} - 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{\text{pQ}}U_{Kd,0} - 1 \end{bmatrix}^{-1}$$

则有:

$$\bar{\mathbf{P}}_{\text{C}} = \mathbf{K}_{\text{C}} \begin{bmatrix} -k_{\text{pUdc}} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{Y}}_{\text{C}} = \mathbf{K}_{\text{C}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_{\text{pUs}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{\text{pP}}I_{d,2,0} & -k_{\text{pP}}I_{q,2,0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{\text{pQ}}I_{q,2,0} & k_{\text{pQ}}I_{d,2,0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\text{pP}}I_{d,2,0} & k_{\text{pP}}I_{q,2,0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\text{pQ}}I_{q,2,0} & -k_{\text{pQ}}I_{d,2,0} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{F}}_{\text{C}} = \mathbf{K}_{\text{C}} \begin{bmatrix} k_{\text{pUdc}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{\text{pUs}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{\text{pP}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_{\text{pQ}} \\ 0 & 0 & -k_{\text{pP}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{\text{pQ}} \end{bmatrix}$$

设节点 N 和节点 K 的电压幅值分别为 $|u_N|$ 和 $|u_K|$, 则式 (23) 中, 有:

$$\mathbf{T}_{\theta} = \begin{bmatrix} -\frac{u_{Ny,0}}{|u_N|^2} & \frac{u_{Nx,0}}{|u_N|^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{u_{Ny,0}}{|u_N|^2} & \frac{u_{Nx,0}}{|u_N|^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{u_{Ky,0}}{|u_K|^2} & \frac{u_{Kx,0}}{|u_K|^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{u_{Ky,0}}{|u_K|^2} & \frac{u_{Kx,0}}{|u_K|^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{u_{Ky,0}}{|u_K|^2} & \frac{u_{Kx,0}}{|u_K|^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{u_{Ky,0}}{|u_K|^2} & \frac{u_{Kx,0}}{|u_K|^2} \end{bmatrix}$$

式 (25) 中, 有:

$$\bar{\mathbf{G}}_{\text{C}} = \bar{\mathbf{Y}}_{\text{C}} (\mathbf{T}_{\text{u},0} + \mathbf{T}_{\text{uT},0} \Delta \mathbf{u}_{xy,0} \mathbf{T}_{\theta}) - \mathbf{T}_{\text{iT},0} \Delta \mathbf{i}_{xy,0} \mathbf{T}_{\theta}$$

式 (26) 中, 有:

$$\bar{\mathbf{H}}_{\text{C}} = [\bar{\mathbf{B}}_{\text{CU}} (\mathbf{T}_{\text{u},0} + \mathbf{T}_{\text{uT},0} \Delta \mathbf{u}_{xy,0} \mathbf{T}_{\theta}) + \bar{\mathbf{B}}_{\text{CI}} \mathbf{T}_{\text{iT},0} \Delta \mathbf{i}_{xy,0} \mathbf{T}_{\theta}] + \bar{\mathbf{B}}_{\text{CI}} \bar{\mathbf{G}}_{\text{C}}$$

附录 D: 2 节点 UPFC 的小信号模型

$\mathbf{T}_{\text{i23}}$ 、 $\mathbf{T}_{\text{u32}}$ 表达式如下:

$$\mathbf{T}_{\text{i23}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{u32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

附录 E：系统整体线性化模型

式（36）中，有：

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= \begin{bmatrix} A_D & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & A_C \end{bmatrix} \\ \tilde{B} &= \begin{bmatrix} B_D & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & B_C & \mathbf{0} \end{bmatrix} \\ \tilde{C} &= \begin{bmatrix} -C_D & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -C_C \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \\ \tilde{D} &= \begin{bmatrix} Y_{DD} - D_D & Y_{DC} & Y_{DL} \\ Y_{CD} & Y_{CC} - D_C & Y_{CL} \\ Y_{LD} & Y_{LC} & Y_{LL} \end{bmatrix} \\ \tilde{E}_C &= \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ E_C \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \\ \tilde{F}_C &= \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ F_C \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

附录 F：测试系统参数

测试系统线路参数见表 F1。

表 F1 线路参数
Table F1 Branch parameters

线路	起始节点	末端节点	R/p.u.	X/p.u.	B/p.u.
1	1	3	0.001	0.01	0
2	3	5	0.002	0.022	0.001
3	4	5	0.002	0.022	0.002
4	5	2	0.001	0.0001	0

以系统基准容量标么的发电机参数和 UPFC 控制器参数分别见表 F2 和表 F3。

表 F2 发电机参数标么值
Table F2 Per unit values of generator parameters

发电机	次暂态电抗	次暂态电势	H	D
1	0.0167	1.0238	45	18
2	0.0056	1.0021	45	45

表 F3 UPFC 控制器参数
Table F3 Parameters of UPFC controllers

参数	定有功功率控制	定无功功率控制	定交流电压控制	定直流电压控制
K_p	0.05	0.1	10	1
T_i	0.1	0.1	0.05	0.001