

UPFC 新型非线性控制策略

奚玲玲,艾 芊,陈 陈
(上海交通大学 电气系,上海 200030)

摘要: 统一潮流控制器(UPFC)可以有效控制线路的有功和无功功率。基于 UPFC 控制线路功率的非线性数学模型,提出了一种新型的非线性控制方法:根据系统能量守恒的特点构造出一个满足 Lyapunov 大范围渐近稳定的函数,再结合精确线性化方法,将控制系统转化为一个简单的线性系统,最后通过线性反馈确定系统的输入量。基于软件 EMTP/EMTPWorks 对 UPFC 的控制装置进行建模,并在典型的长距离输电线路的测试系统中运行,仿真结果验证了所提新型非线性控制策略的正确性,较之于传统的 PI 控制方法,提出的非线性控制方法具有更高的有效性和动态性能;同时也表明了小容量的 UPFC 装置能够很大程度地补偿线路的有功功率,当发生单相接地故障时,UPFC 能提高系统的稳定性。

关键词: 大范围渐近稳定; 精确线性化; 线性反馈; 统一潮流控制器

中图分类号: TM 712;TM 721.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)04-0055-05

0 引言

统一潮流控制器(UPFC)是灵活柔性交流输电系统(FACTS)的一个新的控制装置,也是迄今为止通用性最好的 FACTS 装置之一,包括了电压调节、串联补偿和移相等所有能力;而且可以同时并非常快速地独立控制输电线路中的有功功率和无功功率。在结构上,UPFC 相当于静止同步补偿器(STATCOM)^[1]和静止同步串联补偿器(SSSC)^[2]的组合,由 2 个 GTO^[3-4]实现的电压型逆变器(VSI)公

用一个直流电容组成。在运行过程中,串联侧逆变器提供一个与输电线路同频率串联的电压相量,其幅值变化从 0 到最大值,相角变化范围为 0~360°;并联侧逆变器则发出或者吸收无功功率以维持线路电压平衡并提供串联侧所需要的有功功率。这样就能灵活地调整线路上的潮流并维持电压稳定。

UPFC 在系统中运行的数学模型是一个非线性的动态模型,其控制方法有 PI 控制^[5-6]、解耦控制^[7-9]、线性化控制^[10-12]、人工智能方法^[13](如模糊控制、神经网络)控制等,但这些都有其不足之处^[14]。目前,研究较多的是非线性控制^[15],文献[10]将精确线性化方法应用到 UPFC 的系统控制上,其中结合了最优控制理论;文献[14]的非线性控制应用于并联侧,但

收稿日期:2006-07-04;修回日期:2006-09-29
基金项目:国家自然科学基金重大项目(G50595412)

是串联侧的开环控制稳定性较差。在非线形控制方法中,基于 Lyapunov 稳定性原理^[16-17]的 Lyapunov 函数得到了广泛的应用,通常 Lyapunov 函数需要与其他方法结合才能实现系统性的控制。

现提出一种新型非线性控制策略:在建立五阶的 UPFC 动态数学模型的基础上,针对模型非线性,根据系统能量(功率)守恒特点构造出了满足 Lyapunov 大范围渐近稳定的能量函数,再结合基于精确线性化方法,将 UPFC 的非线性控制系统转化为一个线性化系统,通过线性反馈完成对系统输入量的控制;最后,基于软件 EMTP/EMTPWorks 对 UPFC 的非线性控制系统和通常采用的 PI 控制系统进行建模,并将之放入长距离输电线路 500 kV 的测试系统^[15]中进行测试。仿真结果表明所提出的控制策略能够有效地控制线路功率,而且小容量的 UPFC 装置能够提供很大程度的功率补偿,当单相接地故障发生后,系统具有更好的稳定性和线路输送能力。较之于 PI 控制,该非线性控制具有更好的稳定性和动态性能。

1 UPFC 的数学模型

在运行系统中,UPFC 是安装在系统的某个线路端。UPFC 2 个逆变器的输出分别通过并联变压器和串联变压器与系统线路相连^[18]。图 1 为 UPFC 与系统相连接的简单原理结构图。图 2 为 UPFC 运行时的等值电路图。其中,并联、串联变压器变比为 n_1 、 n_2 , r_1 、 r_2 是折算到线路侧的并联、串联侧变压器和逆变器的导通损耗, L_1 和 L_2 是折算到线路侧的并联、串联变压器的漏感。 U_m 是 UPFC 与系统的接入点电压, C 是直流电容, U_{dc} 是直流电容两端的电压。

采取 Park 变化,选取 U_m 作为参考相量,即 $U_{md}=U_m$, $U_{mq}=0$ 。则 UPFC 的并联、串联侧与系统相连的动态方程如下:

$$\begin{aligned}\frac{dI_{1d}}{dt} &= -\frac{r_1}{L_1}I_{1d} + wI_{1q} + \frac{1}{L_1}(U_{md} - U_{1d}) \\ \frac{dI_{1q}}{dt} &= -wI_{1d} - \frac{r_1}{L_1}I_{1q} - \frac{1}{L_1}U_{1q} \\ \frac{dI_{2d}}{dt} &= -\frac{r_2}{L_2}I_{2d} + wI_{2q} + \frac{1}{L_2}(U_{md} - U_{2d} - U_{rd}) \\ \frac{dI_{2q}}{dt} &= -wI_{2d} - \frac{r_2}{L_2}I_{2q} - \frac{1}{L_2}(U_{2q} + U_{rd})\end{aligned}\quad (1)$$

式中 U_{1d} 、 U_{1q} 、 U_{2d} 、 U_{2q} 是经 park 变换后折算到线路

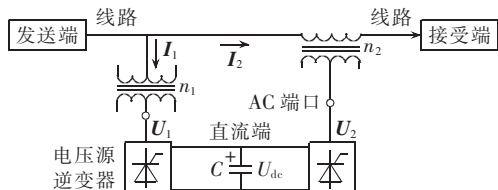


图 1 UPFC 的结构原理图

Fig.1 Principle of UPFC

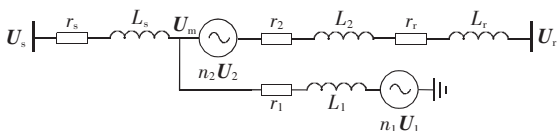


图 2 UPFC 的等值电路图

Fig.2 Equivalent circuit of UPFC

侧的逆变器输出电压; I_{1d} 、 I_{1q} 、 I_{2d} 、 I_{2q} 是经 park 变换后折算到线路侧的电流。

直流电容两端的动态方程为

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} \left(\frac{U_{1d}}{CU_{dc}} I_{1d} + \frac{U_{1q}}{CU_{dc}} I_{1q} + \frac{U_{2d}}{CU_{dc}} I_{2d} + \frac{U_{2q}}{CU_{dc}} I_{2q} \right) \quad (2)$$

逆变器采用正弦脉宽调制法 (SPWM) 控制, 则

$$\begin{aligned}U_{1d} &= k_1 U_{dc} \cos \theta_1, & U_{1q} &= k_1 U_{dc} \sin \theta_1 \\ U_{2d} &= k_2 U_{dc} \cos \theta_2, & U_{2q} &= k_2 U_{dc} \sin \theta_2\end{aligned}\quad (3)$$

方程 (1)~(3) 组成了 UPFC 的动态模型。

用矩阵形式表示 UPFC 的系统模型:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}(\mathbf{X}, \mathbf{U})\mathbf{X} + \mathbf{G}(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \quad (4)$$

其中, 状态变量是

$$\mathbf{X} = [I_{1d} \ I_{1q} \ I_{2d} \ I_{2q} \ U_{dc}]^T$$

输入变量是

$$\mathbf{U} = [k_1 \cos \theta_1 \ k_1 \sin \theta_1 \ k_2 \cos \theta_2 \ k_2 \sin \theta_2]^T = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4]^T$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{X}, \mathbf{U}) = \begin{bmatrix} -r_1/L_1 & w & 0 & 0 & 0 \\ -w & -r_1/L_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_2'/L_2' & w & 0 \\ 0 & 0 & -w & -r_2'/L_2' & 0 \\ \frac{k_1 \cos \theta_1}{CU_{dc}} & \frac{k_1 \sin \theta_1}{CU_{dc}} & \frac{k_2 \cos \theta_2}{CU_{dc}} & \frac{k_2 \sin \theta_2}{CU_{dc}} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{X}, \mathbf{U}) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_1}k_1 U_{dc} \cos \theta_1 + \frac{1}{L_1}U_{md} \\ -\frac{1}{L_1}k_1 U_{dc} \sin \theta_1 \\ -\frac{1}{L_2'}k_2 U_{dc} \cos \theta_2 + \frac{1}{L_2'}U_{md} - U_{rd} \\ -\frac{1}{L_2'}k_2 U_{dc} \sin \theta_2 - \frac{1}{L_2'}U_{rd} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{G}(\mathbf{X}, \mathbf{U})$ 是一个与 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{U}$ 相关的函数阵。

2 控制器设计

2.1 精确线性化

在方程 (4) 中, $\mathbf{A}(\mathbf{X}, \mathbf{U})$ 是一个跟 $\mathbf{X}$ 相关的矩阵, 而不是一个常系数矩阵, $\mathbf{G}(\mathbf{X}, \mathbf{U})$ 也不能表示为常系数矩阵和输入变量 $\mathbf{U}$ 的乘积, 可知 UPFC 的模型是非线性的。

根据微分几何方法中的精确线性化, 选择 $\mathbf{Z}(t) = \mathbf{Z}(\mathbf{X}(t))$, 将以上的非线性系统转化为一个线性系统:

$$\frac{d\mathbf{Z}}{dt} = \mathbf{A}_z \mathbf{Z} + \mathbf{B}_z \mathbf{V} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{Z}$ 是 5×1 相量, $\mathbf{V}$ 可以直接取 $\mathbf{Z}^*$, 便于控制。

装有 UPFC 运行的线路系统在运行过程中总能量和总功率在瞬时都是守恒的, 用功率表达式表示系统的功率即为

$$p_{\Sigma L} + p_C + p_{\Sigma R} = p_s - p_r \quad (6)$$

式中 $p_{\Sigma L}$ 为总电感瞬时功率; p_C 为直流电容瞬时功率; $p_{\Sigma R}$ 为总电阻瞬时功率; p_s 为发送端瞬时功率; p_r 为接受端瞬时功率。

$$\begin{aligned} p_{\Sigma L} &= \frac{3}{2} \frac{d}{dt} \left\{ \frac{L_1}{2} (X_1^2 + X_2^2) + \frac{L_2 + L_r}{2} (X_3^2 + X_4^2) + \right. \\ &\quad \left. \frac{L_s}{2} [(X_1 + X_3)^2 + (X_2 + X_4)^2] \right\} \\ p_{\Sigma R} &= \frac{3}{2} \{ r_1 (X_1^2 + X_2^2) + (r_2 + r_r) (X_3^2 + X_4^2) + \\ &\quad r_s [(X_1 + X_3)^2 + (X_2 + X_4)^2] \} \\ p_s &= \frac{3}{2} U_{sd} (X_1 + X_3) + \frac{3}{2} U_{sq} (X_2 + X_4) \\ p_r &= \frac{3}{2} (U_{rd} X_3 + U_{rq} X_4), \quad p_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{C}{2} X_5^2 \right) \end{aligned}$$

根据能量原理可知,电感和电容储存的能量和功率随着时间的推移逐渐衰减,并经过渐近稳定后达到平衡状态,此时电感、电容的能量和功率最小。

令

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{L_1}{2} (X_1^2 + X_2^2) + \frac{L_2 + L_r}{2} (X_3^2 + X_4^2) + \\ &\quad \frac{L_s}{2} [(X_1 + X_3)^2 + (X_2 + X_4)^2] + \frac{C}{3} X_5^2 \end{aligned} \quad (7)$$

该函数满足 Lyapunov 大范围渐近稳定定理:

$Z_1(\mathbf{X})$ 正定, $\frac{d}{dt} Z_1(\mathbf{X})$ 负定, 且 $\lim_{\|\mathbf{X}\| \rightarrow \infty} Z_1(\mathbf{X}) = \infty$; 再令

$$\begin{aligned} Z_2 &= U_{sd}(X_1 + X_3) + U_{sq}(X_2 + X_4) - U_{rd}X_3 - \\ &\quad U_{rq}X_4 - r_1(X_1^2 + X_2^2) - (r_2 + r_r)(X_3^2 + X_4^2) - \\ &\quad r_s[(X_1 + X_3)^2 + (X_2 + X_4)^2] \end{aligned} \quad (8)$$

构造出 Z_1 和 Z_2 之后,选择 $Z_3 = X_2, Z_4 = X_3, Z_5 = X_4$, 建立一个简单的线性化系统:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \\ Z_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & a_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \\ Z_5 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1^* \\ Z_2^* \\ Z_3^* \\ Z_4^* \\ Z_5^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

$\mathbf{Z}^* = (Z_1^*, Z_2^*, I_{1q}^*, I_{2d}^*, I_{2q}^*)$, * 表示参考值。

以上方程就是线性化后 UPFC 的系统控制模型。

2.2 输入量的反馈控制

在此,UPFC 在系统中运行的目标是为了实现对线路有功功率 P_2 、无功功率 Q_2 及并联侧无功潮流 Q_1 的控制。而

$$\begin{aligned} P_2 &= 3(U_{rd}I_{2d} + U_{rq}I_{2q})/2 \\ Q_2 &= 3(-U_{rd}I_{2q} + U_{rq}I_{2d})/2 \end{aligned} \quad (10)$$

则根据给定 P_2^* 和 Q_2^* , 就可以得出 I_{2d}^* 和 I_{2q}^* 。 Q_1^* 由 I_{1q}^* 确定。

所以,当 P_2^*, Q_2^*, Q_1^* 和电容电压 U_{dc}^* 确定后,加上约束条件 $\dot{Z}_1 = Z_2$ 和 $Z_2^* = 0, I_{1d}^*$ 即确定,则系统的控制目标也就确定,即

$$[X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4 \ X_5]^T \xrightarrow{t \rightarrow t_1} [X_1^* \ X_2^* \ X_3^* \ X_4^* \ X_5^*]^T$$

在线性系统(9)中表示:

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{Z}(\mathbf{X}(t)) \xrightarrow{t \rightarrow t_1} [\mathbf{Z}_1^* \ \mathbf{Z}_2^* \ \mathbf{Z}_3^* \ \mathbf{Z}_4^* \ \mathbf{Z}_5^*]^T$$

根据极点配置法,可以选择合适的矩阵 $\mathbf{A}_Z$ 和 $\mathbf{B}_Z$ 的参数 a_1, a_2 和 a 使得 $\mathbf{Z}$ 在一定时间 t_1 内渐进稳定到 $\mathbf{Z}^*$, 此时 $\mathbf{X}$ 也稳定到了 $\mathbf{X}^*$ 。因为根据式(9)可以

推出 $\mathbf{Z}$ 在频域下的解为

$$\mathbf{Z} = (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_Z)^{-1} \mathbf{B}_Z \mathbf{Z}^* \quad (11)$$

结合式(4)和(9)可得:

$$\frac{d\mathbf{Z}}{d\mathbf{X}} [\mathbf{A}(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \mathbf{X} + \mathbf{G}(\mathbf{X}, \mathbf{U})] = \mathbf{A}_Z \mathbf{X} + \mathbf{B}_Z \mathbf{Z}^* \quad (12)$$

该式中,只有 $\mathbf{X}, \mathbf{Z}, \mathbf{Z}^*$ 和 $\mathbf{U}$, 所以可以推出函数 $\mathbf{U} = \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Z}, \mathbf{Z}^*)$, 也即 UPFC 控制系统的唯一输入变量 $\mathbf{U} = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4]^T$ 确定。

3 算例分析

图 3 是一个两区域通过 500 kV 双回线连接的测试系统^[10], 用于测试 UPFC 补偿性能和控制策略。2 个区域之间,电压相相差 $\delta = 30^\circ$, 通过长为 600 km 的双回输电线路相连。其中,UPFC 装置的变压器及逆变器参数为 $r_1 = r_2 = 4 \ \Omega, X_1 = X_2 = 8 \ \Omega, C = 50 \ \mu\text{F}$ 。

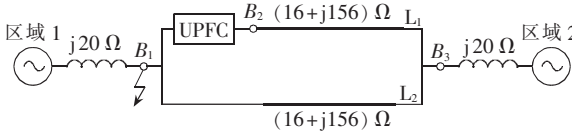


图 3 测试系统

Fig.3 A test system for UPFC

图 3 的系统包括 UPFC 的主电路逆变器及其控制装置都在 EMTP/EMTPWorks 进行建模,并通过仿真验证 UPFC 的补偿性能和控制策略的准确性。在此,主电路逆变器采用 SPWM 技术控制由 GTO 组成的六相电桥。

目前,在 UPFC 运行的实际系统和大量的仿真分析中都是采用 PI 控制,故将 UPFC 的非线性控制和文献[20]的 PI 控制方法进行比较,以验证所提出的非线性控制的优越性,仿真结果如图 4 所示(曲线 1 为非线性控制,曲线 2 为 PI 控制)。

最初 UPFC 装置没有接入系统,线路 L_1 的传输功率为 $P_{20} = 536 \text{ MW}, Q_{20} = 67 \text{ Mvar}$ 。在系统稳定 1.2 s 之后,将 UPFC 装置安装在传输线路 L_1 的初始端中运行,并设定电容电压稳定 $U_{dc}^* = 75 \text{ kV}$, L_1 线路的传输功率为 $P_2^* = 800 \text{ MW}, Q_2^* = 50 \text{ Mvar}$, UPFC 并联端无功设为 $Q_1^* = -20 \text{ Mvar}$; 在 $t = 1.75 \text{ s}$ 时,改变 L_1 线路功率 $P_2^* = 10^3 \text{ MW}, Q_2^* = 35 \text{ Mvar}$, 并联端 $Q_1^* = 10 \text{ Mvar}$; $t = 2.5 \text{ s}$, L_1 功率 $P_2^* = 850 \text{ MW}, Q_2^* = 73 \text{ Mvar}, Q_1^* = -10 \text{ Mvar}$ 。测试中还设计了一个故障,当系统运行在 $t = 3 \text{ s}$ 时,双回长距离传输线始端发生 a 相接地短路,0.1 s 后断路器断开,再过 0.6 s, a 相恢复正常运行。

图 4(a)(b)(c)分别为 L_1 线路的传输瞬时有功、无功功率和 UPFC 的并联侧无功在非线性和 PI 控制下的曲线。从图中知,将 UPFC 装置投入到一个稳定的线路传输系统需要相对较长的时间达到新的稳定状态,但是投入运行稳定后, P_2, Q_2 和 Q_1 只需要很短的时间就可以实现控制目标的改变。2 种控制方式下曲线比较可知:非线性控制情况下,当参考值变化时,功率曲线波动较平缓,相应时间更短;而 PI 控制下每次参考值变化时,功率曲线波动幅度较

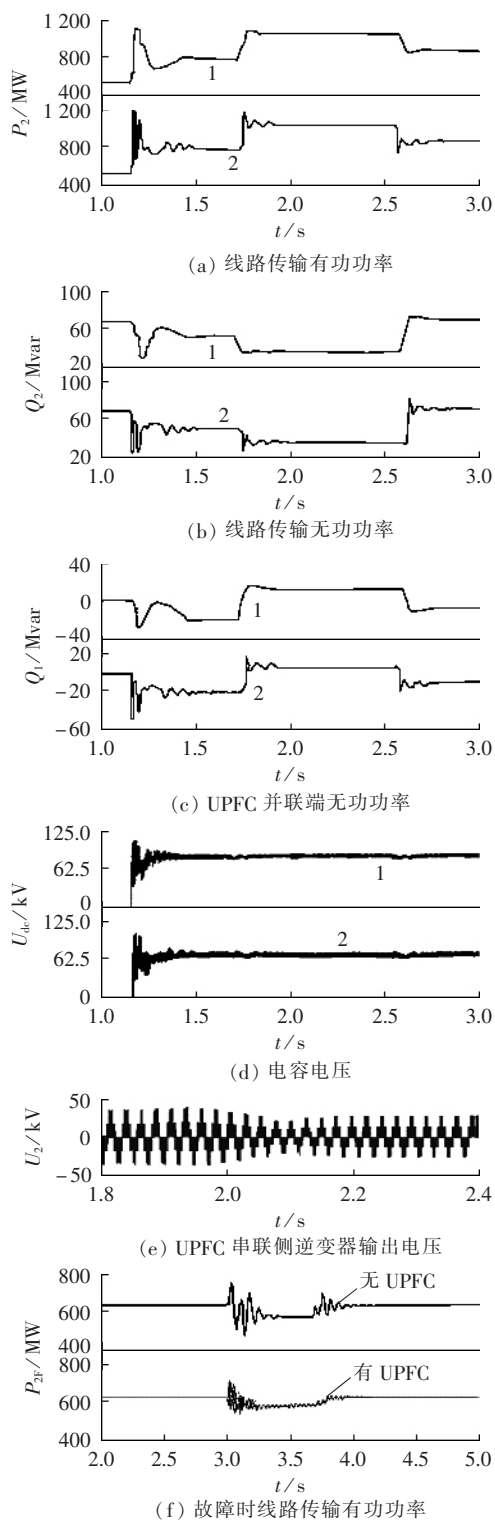


图 4 仿真结果

Fig.4 Simulation results

大,需要相对较长的时间达到新的稳定状态。图 4(a)(b)表明了 UPFC 能够有效地控制线路的传输功率且非线性控制比 PI 控制效果更好。

图 4(d)是直流电容电压的动态响应曲线,从图中可看出,当 UPFC 投入运行后,电容电压能够很快地稳定在 $U_{dc}=75\text{ kV}$ 左右。而在非线性控制下的电容电压要比 PI 控制下的电压更稳定、波动范围更小,准确度更高。结合图 4(a),在图 3 的 500 kV 长

距离输电线测试系统中,当直流容量仅为 $U_{dk0}=75\text{ kV}$ 时,UPFC 可以很大程度地提高线路的传输功率。

因逆变器采用 SPWM 技术控制,所以 UPFC 装置的串联侧逆变器的输出电压 U_2 图形如图 4(e)所示, U_2 是 UPFC 串联于传输线上的等效电压,为此它的大小决定了传输功率 P_2 、 Q_2 ,结合图 4(a)(b),可得在 $t=2\text{ s}$ 附近, U_2 的改变与 P_2 和 Q_2 的改变同步。

在 $t=3\text{ s}$ 时,双回长距离传输线的始端发生 a 相接地短路,0.1 s 后断路器断开,再过 0.6 s, a 相恢复正常运行。图 4(f)是有、无 UPFC 装置的故障过程中线路传输功率的比较图;从图中可以看出,加入 UPFC 后,线路的传输功率自故障后没有大幅度降低,而是稳定在比没有安装 UPFC 大的功率上,当故障排除后,加入 UPFC 的线路能够更快地恢复正常运行,提高了线路的输送能力和系统的稳定性。

从以上的分析可知,采用 UPFC 新型的非线性控制方法比文献[20]提供的 PI 控制方法具有更好的稳定性;在 UPFC 投入运行时,采用非线性控制能够更快地使系统稳定,在参考值改变时,非线性方法比 PI 控制具有更短的响应时间,波动幅度也较小;且非线性控制还有提高系统稳定性的功能。

本算例验证了所建立的 UPFC 模型和控制策略的精确性和快速性,表明了投入 UPFC 的输电线路具有更大的传输功率和更好的稳定性。

4 结论

UPFC 是用来控制线路中的传输有功和无功功率的,针对 UPFC 在系统中运行的数学模型的特点,提出了一种应用 Lyapunov 函数的新型非线性控制策略,通过在软件 EMTF/EMTPWorks 的建模仿真,得出以下结论:

a. 在典型 500 kV 长距离输电线测试系统中的仿真结果验证了所提出的新型非线性控制策略的正确性和动态响应的快速性,较之于传统的 PI 控制方法,所提出的非线性控制策略具有更高的准确性和有效性;

b. 测试算例中,当直流电容 $U_{dk0}=75\text{ kV}$ 时,装有 UPFC 的线路系统就能够很大程度地提高线路传输功率,并且当单相接地故障发生时,线路系统具有更好的稳定性。

参考文献:

- [1] YANG Ye, KAZERANI M, QUINTANA V H. Current-source converter based STATCOM: modeling and control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 795-800.
- [2] HAN B, MOON S, PAPK J. Dynamic characteristic analysis of multi-bridge PWM inverter for SSSC[C]//Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle, WA: IEEE, 2000: 1618-1623.
- [3] TAMAI S, MURAKAMI S, UCHIDA R. Control and performance of a self-commutated GTO converter operating in parallel with line-commutated thyristor converters[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2004, 51(1): 67-73.
- [4] SEDRAOUI K, AL-HADDAD K, CHANDRA A, et al. Versatile

- control strategy of the unified power flow controller (UPFC) [C]//Conference on Electrical and Computer Engineering. Halifax, NS, Canada: IEEE, 2000: 142-147.
- [5] KANNAN S, JAYARAM S, SALAMA M. Component level cascade control of UPFC [C]//Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle, WA: IEEE, 2000: 502-507.
- [6] 张扬, 毛雪雁, 徐政. 用于电网稳态和暂态分析的统一潮流控制器模型[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 30-33.
ZHANG Yang, MAO Xue-yan, XU Zheng. UPFC models for power system steady-state and dynamic analysis[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 30-33.
- [7] 陈众, 颜伟. 统一潮流控制器的智能解耦与结构设计研究[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 23-27.
CHEN Zhong, YAN Wei. Intelligent decoupling of UPFC controller and its structural design[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 23-27.
- [8] 鞠儒生, 陈宝贤, 邱晓刚. UPFC 控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 60-65.
JU Ru-sheng, CHEN Bao-xian, QIU Xiao-gang. Basic control of unified power flow controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 60-65.
- [9] KANNAN S, JAYARAM S, SALAMA M A. Real and reactive power coordination for a unified power flow controller[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1454-1461.
- [10] 谢桦, 梅生伟. 统一潮流控制器的非线性控制和对电力系统稳定性的改善[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(19): 1-5.
XIE Hua, MEI Sheng-wei. Nonlinear control for UPFC to improve transient stability of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(19): 1-5.
- [11] 杜继伟, 王奔. 基于非线性变结构控制的统一潮流控制器对电力系统稳定性改善的研究[J]. 电力科学与工程, 2005, 3(3): 17-20.
DU Ji-wei, WANG Ben. Power system stability improvement using UPFC based on nonlinear variable structure control[J]. Electrical Power Science and Engineering, 2005, 3(3): 17-20.
- [12] 颜伟, 朱继忠, 徐国禹. UPFC 线性最优控制方式的研究及其对暂态稳定性的改善[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 45-49.
YAN Wei, ZHU Ji-zhong, XU Guo-yu. Enhancement of system stability using linear optimal control strategy of UPFC [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 45-49.
- [13] MOK T K, NI Yi-xin, WU F F. Design of fuzzy damping controller of UPFC through genetic algorithm [C]//Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle, WA: IEEE, 2000: 1889-1894.
- [14] 袁志昌, 宋强. 统一潮流控制器的非线性控制[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 36-39.
YUAN Zhi-chang, SONG Qiang. A nonlinear controller for unified power flow controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 36-39.
- [15] 卢强. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [16] 吴麒. 自动控制原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [17] GHANDHARI M, ANDERSSON G. Control Lyapunov functions for controllable series devices [J]. Transactions on Power Systems, 2001, 16(4): 689-694.
- [18] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [19] MATHUR R M, VARMA R K. 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [20] PAPIC I, ZUNO P, POVH D, et al. Basic control of unified power flow controller[J]. IEEE Transactions on Power System, 1997, 12(4): 1734-1739.
- [21] AZBE V, GABRIEL U, POVH D. The energy function of a general multimachine system with a unified power flow controller [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1478-1485.
- [22] WANG Hai-feng. A unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations of unified power flow controller [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(3): 978-983.
- [23] DONG L Y, ZHANG L, CROW M L. A new control strategy for the unified power flow controller [C]//Power Engineering Society Winter Meeting. Seattle, WA: IEEE, 2002: 562-566.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

奚玲玲(1982-), 女, 浙江象山人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统 FACTS 装置的原理和模型仿真及在并网风电场中的应用;

艾 芊(1969-), 男, 湖北武汉人, 副教授, 博士, 研究方向为电能质量、人工智能以及在电力系统中的应用、电力系统元件建模、电力系统继电保护、故障诊断与定位;

陈 陈(1938-), 女, 上海人, 教授, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制、小干扰稳定、FACTS 等。

Novel nonlinear control scheme of UPFC

XI Ling-ling, AI Qian, CHEN Chen

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: UPFC (Unified Power Flow Controller) is always used to control the active and reactive power of transmission lines. Based on the nonlinear mathematic equations of power system with UPFC, a nonlinear control method for UPFC is proposed. A function is constructed based on energy conservation to meet the Lyapunov globally asymptotical stability. Combined with exact linearization, the nonlinear control system is then degraded to a simple linear system and input variables are deduced by linear feedback control. Devices of UPFC are modeled on EMTP/EMTPWorks and tested in a typical system with long transmission lines. Simulation results demonstrate the correctness of the proposed controller and its better stability and dynamic performance than PI controller. It also indicates that the UPFC device with small capacity can offer larger series compensation to system and enhance system stability, especially when a single-phase grounding fault happens.

This project is supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China (G50595412).

Key words: globally asymptotical stability; exact linearization; linear feedback; UPFC