

76-80

14

统一潮流控制器最优控制系统设计

Optimal Control System for UPFC

罗春雷
Luo Chunlei

孙洪波
Sun Hongbo

徐国禹
Xu Guoyu

(重庆大学电气工程系, 重庆, 630044; 第一作者 27 岁, 男, 博士生)

TM72
TM571

摘要 首先通过对统一潮流控制器(UPFC)内部动态过程的分析,进而提出了用一五阶微分方程来描述 UPFC 的动态行为,并设计了最优控制系统。通过一输电系统的暂态仿真,验证了该方法的有效性。

关键词 最佳控制系统 / 暂态仿真; 统一潮流控制器

输电系统

中国图书资料分类法分类号 TM711

ABSTRACT This paper first analyzes the internal dynamic process of the UPFC, then a five-order differential equation is presented to describe dynamic behavior of UPFC. In term of this, a optimal control system is designed. Dynamic simulation of a transmission system demonstrates the effectiveness.

KEYWORDS optimal control systems / transient simulation; UPFC

0 引 言

统一潮流控制器^[1](Unified Power Flow Controller, 简称 UPFC)的概念最初是由美国西屋科技中心的 L. Gyugyi 博士提出的,它能分别或同时实现并联补偿、串联补偿、移相等几种不同的功能。UPFC 作为灵活交流输电系统(Flexible AC Transimission System, 简称 FACTS)最成功的技术实现,已广泛引起了各国电力界的高度重视。

许多文献已经论述了 UPFC 的基本工作原理,指出 UPFC 可以同时控制母线电压和线路功率。另外,UPFC 还具有阻尼功率振荡,提高系统稳定性的作用。然而,由于 UPFC 出现的历史较短,在控制方面研究的文献还不多见,特别是 UPFC 数学模型的建立,以及采用现代控制理论进行控制系统的设计研究更是少见。也有作者在未考虑 UPFC 的内部动态行为的基础上,应用 PID 和非线性控制理论分别研究了 UPFC 作为移相器、静止补偿器等时的动态行为^{**}。

笔者则通过引入能量的观点,列写出了 UPFC 内部的功率关系式,进而提出采用一五阶非线性微分方程组来描述 UPFC 的动态过程,较全面地反映了 UPFC 的控制行为,并应用线

* 收文日期 1996-06-28

** Wu Shouyuan, Zhou Xiaoxin, Zhao He, et al. Unified power flow controller in power system to improve power system stability. ICPST' 94 Beijing China, 949~954

性最优控制理论进行了最优控制规律的设计。通过一输电系统的暂态仿真,表明了 UPFC 在提高系统稳定性上的显著作用,同时也验证了本文方法的可行性。

1 含 UPFC 的数学模型

用于研究 UPFC 控制问题的输电系统如图 1 所示,UPFC 装设在发电机机端附近,稳态时的主要作用是对机端电压和送入系统的功率进行控制,控制功率经变压器和双回线路送入系统。

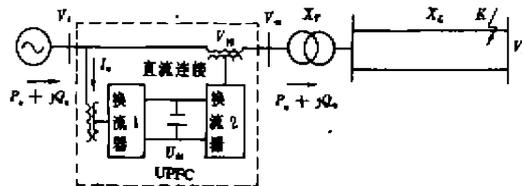


图 1 用于 UPFC 研究的系统图

为了更好地表明 UPFC 的阻尼功率振荡作用,设正常运行时 UPFC 未施加任何控制作用,即 UPFC 的串联电压 $V_m = 0$, 并联支路上的电流 $I = 0$, 由稳态运行时,UPFC 既不吸收有功功率,也不发出有功功率,则 $V_1 = V_m, P_1 + jQ_1 = P_2 + jQ_2$.

由转子运动方程式:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega \tag{1}$$

$$\frac{H}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - P_d \tag{2}$$

对于图 1 所示系统,设发电机为隐极发电机,其有功功率方程式可表示为:

$$P_e = \frac{E_f V_1}{X_d} \sin \delta_e \tag{3}$$

其中, $P_d = \frac{D}{\omega_0} \omega$. 以上各式中变量的意义参见文献[2].

为了仿真 UPFC 的动态过程,必须建立 UPFC 装置的动态模型。而建立 UPFC 装置的精确数学模型是比较困难的,因为 UPFC 的控制变量多,控制规律复杂。因此,有必要对 UPFC 的内部控制作一定的简化。假设:

- 1) 忽略 UPFC 整流与逆变过程所出现的谐波分量,而只考虑基波分量;
- 2) 由于重叠角 γ 一般较小,因此可忽略不计;
- 3) UPFC 是一理想的无损装置,不消耗有功功率和无功功率。

由整流与逆变过程的电压关系知:

$$k_1 V_1 \cos \alpha = U_d \tag{4}$$

$$k_2 V_m \cos \beta = -U_d \tag{5}$$

对于 UPFC 的控制作用,使得发电机机端电压 V_1 的变化很小, V_m 的变化可直接用 V_d 的变化来体现,这一点由仿真结果可得到进一步证实。因此可将 V_m 对 UPFC 的内部关系式转化

为 V_m 对 UPFC 的内部关系式,即将(5)式变换为:

$$k_m V_m \cos \beta = -U_{dc} \quad (6)$$

这里应注意的是,在控制系统设计完成后,仍应用式(5)来进行系统的暂态仿真。以上各式中, U_{dc} 为 UPFC 内部的直流耦合电压; k_i , k_m 和 k_n 为比例常数; α 和 β 分别为控制角和逆变角。

在稳态运行时,UPFC 串联控制支路上的有功功率由并联控制支路提供,UPFC 内部的支路耦合电容既不充电,也不放电。当 UPFC 处于动态过程时,串联控制支路上的有功功率和并联控制支路上的有功功率将不可能完全一致,此时,两控制支路上的功率之差将由直流耦合电容来承担。由 UPFC 具有一定的无功补偿能力,因此该直流耦合电容所承担的能量不应超过此能量。同时,该能量通过 UPFC 串联控制和并联控制的共同作用,能够实现四象限控制。

通过引入能量的观点,即 UPFC 中直流电容的能量为整流与逆变过程能量之差,亦即发电机输出的能量与送入系统的能量之差,从而 UPFC 的内部能量交换可表示为:

$$C_d U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_s - P_r \quad (7)$$

其中, C_d 为 UPFC 直流耦合电容器的电容值, P_s 用以下功率方程式表示:

$$P_s = \frac{V_s V_1}{X_L + X_r} \sin(\delta - \delta_m) \quad (8)$$

由于电压 V_1 的相角 δ 和电压 V_m 的相角 δ_m 的改变,对直流耦合电压 U_{dc} 有直接的影响,因此在动态过程中, δ 和 δ_m 的调节可采用 PI 调节方式建立如下关系式^[3]:

$$T_i \frac{d\delta_i}{dt} + \delta_i = k_m U_{dc} \quad (9)$$

$$T_n \frac{d\delta_n}{dt} + \delta_n = k_n U_{dc} \quad (10)$$

上式中, T_i 和 T_n 为时间常数; k_m 和 k_n 为比例系数。

2 最优控制系统的设计

对以上各方程式加以整理,将(3)、(4)、(6)和(8)式代入式(7),即可得到一关于 U_{dc} 的微分方程式。再联立式(2)~(4)式,即可得到一关于 ω 的微分方程式。将以上两微分方程式同(1)、(9)和(10)式,即可得到一描述 UPFC 动态行为的五阶状态方程。选择恰当的状态变量和控制变量,并在运行点处进行偏差化和线性化,可以列写出 UPFC 控制系统的状态方程式为:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (11)$$

$$\text{其中: } X = [\Delta \delta \quad \Delta \omega \quad \Delta \delta_i \quad \Delta \delta_n \quad \Delta U_{dc}] \quad (12)$$

$$U = [\Delta \alpha \quad \Delta \beta] \quad (13)$$

限于篇幅, A, B 两矩阵中的元素不再给出。

由于这里主要研究 UPFC 的阻尼作用, 同时考虑到发电机具有快速励磁调节器, 因而在暂态过程中可假设发电机的 Q 轴电势 E_q 保持不变, 即在整个暂态过程中令 $E_q = \text{常数}$, 并近似认为汽门或导水叶开度不变, 即令 $\Delta P_m = 0$ 。

根据线性最优控制原理及最优控制器的设计方法, 即可得到 UPFC 的最优控制系统。进行最优控制系统设计以前, 应首先判别该系统是否具有完全的可控性。这里不加严格的证明, 认为所研究的系统是完全可以控的。从而可求出的最优反馈增益矩阵 K , 并进一步得到最优控制量:

$$\Delta \alpha = k_{11} \Delta \delta + k_{12} \Delta \omega + k_{13} \Delta \delta_i + k_{14} \Delta \delta_m + k_{15} \Delta U_d \quad (14)$$

$$\Delta \beta = k_{21} \Delta \delta + k_{22} \Delta \omega + k_{23} \Delta \delta_i + k_{24} \Delta \delta_m + k_{25} \Delta U_d \quad (15)$$

3 仿真研究

对于图 1 所示输电系统, 用上述方法设计的最优控制规律进行了暂态仿真。由于三相短路是最严重的故障情况, 故可采用该情况进行仿真。设 0.1 s 时在图 1 所示的 K 点发生三相短路, 0.2 s 切除一回线路, 1 s 时重合闸成功。系统在线性最优励磁控制器的作用下不能保持稳定, 而在 UPFC 最优控制系统作用下却取得了很好的控制效果。为了比较说明, 对线性最优励磁控制器, 重合闸成功取为 0.7 s, 发电机的功角 δ , 角速度 ω , 电磁功率 P_e 和发电机端电压 V_t 的动态响应曲线如图 2 所示, 图 2(c), (d) 的 P_e, V_t 数值均为标么值。图中曲线 1 为 UPFC 最优控制系统作用的效果, 曲线 2 为线性最优励磁控制器作用的效果。为了分析比较, 在图 3 中给出了 UPFC 最优控制系统作用时, 功率 P_e 的动态响应曲线。图 3 的 P_e 数值均为标么值。

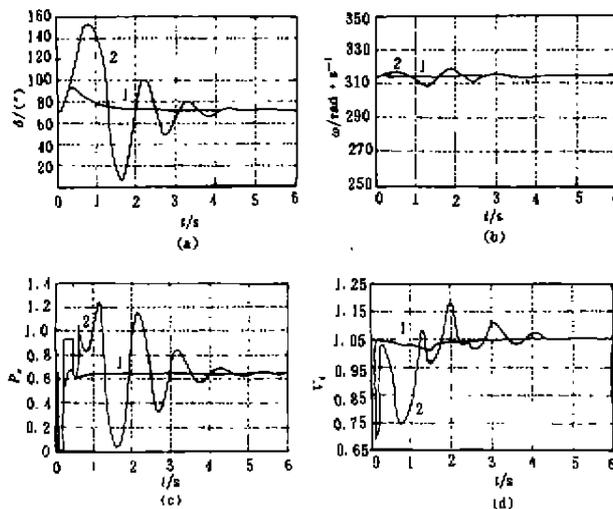


图 2 UPFC 最优控制系统与线性最优控制仿真曲线

从图 2 可以发现, 由于 UPFC 内部耦合电容及两控制支路的作用, 使得 UPFC 具有较强的阻尼功率振荡的作用, 大大提高了系统的稳定性。

由图3还可发现,UPFC最优控制系统作用时功率 P_s 的动态响应曲线,与线性最优励磁控制器作用时电磁功率 P_s 的动态响应曲线有相似的变化规律,且它的控制效果更好,因此可以认为UPFC一方面对电压 V_m 的合理控制,改善了功率 P_s 的传输,从而提高了系统的稳定性;另一方面,UPFC利用其内部的支路耦合电容,增大了动态过程中的减速面积,从而进一步改善了系统的动态品质。

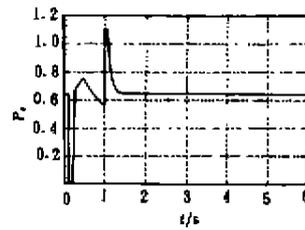


图3 功率 P_s 仿真曲线

4 结 论

- 1) 本文对UPFC数学模型作了较深入的研究,能够全面地反映UPFC的动态行为,为现代控制理论进一步在UPFC控制系统中的应用奠定了基础;
- 2) 从上述仿真结果及分析可以看出,对UPFC施以适当的控制规律,将具有较好的阻尼功率振荡的作用,能显著改善系统的动态品质;
- 3) 对UPFC内部控制规律的研究,以及增强UPFC控制的鲁棒性,都将是值得进一步深入的课题。

参 考 文 献

- 1 Gyugyi L. Unified power-flow control concept for flexible AC transmission system. IEE PROCEEDINGS-C, 1992, 139(4), 323~331
- 2 卢强,王仲涛,韩英铎. 输电系统最优控制. 北京:科学出版社,1982. 143~157
- 3 孙元章,刘建政,杨志平,等. ASVG动态建模与暂态仿真研究. 电力系统自动化,1996,20(1),5~10

附 录

1) 输电系统参数及初始运行状态

$$X_s = 2.534, X_r = 0.01, X_L = 1.46, T_{e0} = 10^{\circ}, H = 8.0^{\circ}, D = 5.0, \\ \alpha_0 = 20^{\circ}, \beta_0 = 120^{\circ}, \delta = 71.73^{\circ}, V_s = 1.0, V_r = 1.05, P_s = 0.65$$

2) UPFC控制系统参数及约束

$$C_s = 5.0, U_{dc0} = 1.0, T_i = 0.1, T_m = 0.1, \\ Q = \text{diag}[5\ 000, 1\ 000, 1\ 000, 100, 1\ 000], R = \text{diag}[1, 1] \\ 5^{\circ} \leq \alpha \leq 80^{\circ}, \quad 95^{\circ} \leq \beta \leq 170^{\circ}$$