

多馈入高压直流输电系统非线性附加控制器的设计

李兴源, 陈凌云, 颜泉, 王路

(四川大学电气信息学院, 四川省成都市 610065)

DESIGN OF NONLINEAR COMPLEMENTARY CONTROLLERS FOR MULTI-INFEED HVDC TRANSMISSION SYSTEMS

LI Xing-yuan, CHEN Ling-yun, YAN Quan, WANG Lu

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: The complementary controllers for HVDC transmission systems can be used to improve the power system stability. A design method of the complementary controller for multi-infeed HVDC transmission systems using nonlinear control theory is presented in this paper. Firstly, the model of a multi-infeed HVDC transmission system is constructed. Then the control rules are derived, in which the influence between the two additional controllers for the HVDC links is considered in the design process. Finally, a test system including three-machine and two HVDC links is simulated. The simulation results show that the nonlinear controllers can be used to improve the power system stability better than conventional controllers.

KEY WORDS: Power system; Multi-infeed HVDC; Nonlinear additional control

摘要: 高压直流输电(HVDC)系统的附加控制器可以改善系统的稳定性。该文针对多馈入高压直流输电系统,应用非线性控制系统理论设计了直流系统的附加控制器。首先建立了多馈入高压直流输电系统的数学模型。然后推导出稳定控制规律,该规律考虑了2条直流系统附加控制的相互影响。最后以一个3机和2条直流联络线构成的系统为例进行了仿真研究。仿真结果表明:与传统的控制器相比,该控制器能更好地改善系统的稳定性。

关键词: 电力系统;多馈入高压直流输电;非线性附加控制

1 引言

在交、直流混合输电系统中,直流联络线减缓了一个受扰动的交流系统对另一个交流系统的影

响,但同时也阻碍了有利于维持交流系统稳定的同步功率的传输^[1]。对于交流系统,直流换流器是一个对频率不敏感的负荷,这可能产生导致系统摇摆的负阻尼。因此常需要通过附加控制来拓展直流联络线的控制能力,以提高交流系统的动态性能^[2-3]。而该附加控制的有效性及其性能的好坏在很大的程度上受附加控制器的结构和设计原理影响。因此在交、直流混合输电系统中,可设计适用于直流系统的附加控制器以增强系统的稳定性^[4-5]。实际上从改善系统稳定性的角度考虑,可将直流系统的附加控制器看成是系统的稳定控制器。

近年来在系统规划和运行中已开始考虑多馈入直流系统控制的复杂性^[6-8]。多馈入HVDC系统的结构较新,对其分析较复杂,其中的换流器控制对保证系统的性能起着十分重要的作用^[9-13]。

本文将非线性控制理论^[14]应用于HVDC系统附加控制器的设计中,并以一包含有2条直流线路的系统为例,研究多馈入直流系统中非线性附加控制器的设计方法。该方法选取三端等值系统的功角差为控制目标,提高了系统的暂态稳定性。在研究非线性控制理论应用于直流系统附加控制器的同时,也探讨了利用非线性的方法对两个直流系统的附加控制器进行协调控制的策略。由于该方法主要是针对全系统的结构来推导控制规律,因此以下将根据具体的系统结构来建立控制系统的数学模型。

2 控制系统的数学模型

本文设计的直流系统的附加控制器以功率调制为目标。直流传输功率的给定值或为根据需求所选定的固定值,或为如图1所示的加入一个功率调

基金项目: 国家自然科学基金项目(50595412; 50377017); 国家重点基础研究专项经费项目(2004CB217907)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50595412; 50377017). Project Supported by Special Fund of the National Priority Basic Research of China(2004CB217907).

制信号 P_{mod} (P_{mod} 由附加控制器产生) 的之后得出的整定值。文中所采用的测试系统的结构如图 2 所示, 两条直流线路的逆变侧换流器联接在电气上很邻近的交流母线上。

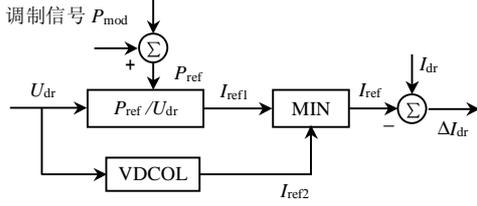


图 1 定电流控制原理图

Fig. 1 The principle of constant current control

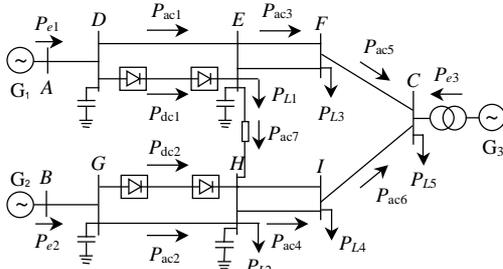


图 2 仿真测试系统模型

Fig. 2 The model of the study system

图中的 3 台发电机可以理解为 3 个地区的等值发电机, 这样, 即使对于更加复杂的系统结构来说, 只要能够解决模型等值的问题, 就可以通过以下方法推导出附加控制器的非线性控制规律。

测试系统中发电机转子的运动方程为

$$\dot{d}_i = w_i \quad (1)$$

$$\dot{w}_i = w_0 [P_{mi} - (D_i / w_0) w_i - P_{ei}] / H_i, i=1,2,3 \quad (2)$$

式中 w_0 为发电机的额定转速; H 为转动惯量; D 为阻尼系数; P_m 为机械功率; P_e 为电磁功率。

选择位于直流系统受端的发电机 G_3 为参考机, 结合各发电机的电磁功率以及各线路传输功率与系统负荷之间的关系, 经推导可以得到用相对转子角和相对转速表示的运动方程式为

$$\dot{d}_{13} = w_{13} \quad (3)$$

$$\dot{d}_{23} = w_{23} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{w}_{13} = & \left(\frac{w_0}{H_1} P_{m1} - \frac{w_0}{H_3} P_{m3} \right) - \left(\frac{D_1}{H_1} w_1 - \frac{D_3}{H_3} w_3 \right) - \\ & \left(\frac{w_0}{H_1} + \frac{w_0}{H_3} \right) P_{dc1} - \frac{w_0}{H_3} P_{dc2} - \left(\frac{w_0}{H_1} + \frac{w_0}{H_3} \right) P_{ac1} - \\ & \frac{w_0}{H_3} P_{ac2} + \frac{w_0}{H_3} P_{L\Sigma} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\dot{w}_{23} = \left(\frac{w_0}{H_2} P_{m2} - \frac{w_0}{H_3} P_{m3} \right) - \left(\frac{w_0}{H_2} + \frac{w_0}{H_3} \right) P_{dc2} -$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{D_2}{H_2} w_2 - \frac{D_3}{H_3} w_3 \right) - \left(\frac{w_0}{H_2} + \frac{w_0}{H_3} \right) P_{ac2} - \\ & \frac{w_0}{H_3} - P_{dc1} \frac{w_0}{H_3} P_{ac1} + \frac{w_0}{H_3} P_{L\Sigma} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $P_{L\Sigma} = P_{L1} + P_{L2} + P_{L3} + P_{L4} + P_{L5}$ 。

在研究交直流系统稳定控制时, 将对直流功率的调节视为一阶惯性环节, 即 2 条直流线路的直流功率状态方程可写为

$$\dot{P}_{dc1} = (-P_{dc1} + P_{dcref1} + u_{dc1}) / T_{d1} \quad (7)$$

$$\dot{P}_{dc2} = (-P_{dc2} + P_{dcref2} + u_{dc2}) / T_{d2} \quad (8)$$

式中 P_{dcref} 为直流功率的给定值; T_{di} 为时间常数; U_{dc} 为直流系统的控制量。

为保持整个系统的稳定性, 将系统中发电机的相对转子角度的增量作为非线性控制器设计的输出方程, 即为

$$y_1(t) = d_{13} - d_{130} \quad (9)$$

$$y_2(t) = d_{23} - d_{230} \quad (10)$$

式(3)~(10)即为所构建控制系统的数学模型。

3 控制器设计

本文采用文献[14]的状态反馈线性化方法将控制系统的非线性模型转化为线性模型。其原理是对给定的多输入非线性控制系统 $\dot{X} = f(X) + g(X)U$, 通过反馈 $U = A(X) + B(X)V$ 以及坐标映射 $F: Z = F(X)$, 使得反馈系统 $\dot{X} = f(X) + g(X)A(X) + g(X)B(X)V$ 变为一个完全能控的线性系统如下:

$$\dot{Z} = A_Z Z + B_Z V \quad (11)$$

对文中的双输入双输出非线性系统, 根据多输入多输出系统关系度的定义及李导数的计算方法, 可求得该系统的关系度总数为 6, 等于系统的阶数。由多输入多输出非线性控制系统的设计原理可知, 该控制系统可通过适当的坐标映射转化为以新坐标系表述的线性化标准型。根据坐标映射的选择原则, 可以采用坐标变换 $Z = F(X)$, 即

$$z_1 = d_{13} - d_{130}; \quad z_2 = w_{13}; \quad z_4 = d_{23} - d_{230}; \quad z_5 = w_{23};$$

$$z_3 = \dot{w}_{13} = \left(\frac{w_0}{H_1} P_{m1} - \frac{w_0}{H_3} P_{m3} \right) - \left(\frac{D_1}{H_1} w_1 - \frac{D_3}{H_3} w_3 \right) -$$

$$\left(\frac{w_0}{H_1} + \frac{w_0}{H_3} \right) P_{dc1} - \frac{w_0}{H_3} P_{dc2} - \left(\frac{w_0}{H_1} + \frac{w_0}{H_3} \right) P_{ac1} -$$

$$\frac{w_0}{H_3} P_{ac2} + \frac{w_0}{H_3} P_{L\Sigma};$$

$$z_6 = \dot{w}_{23} = \left(\frac{w_0}{H_2} P_{m2} - \frac{w_0}{H_3} P_{m3} \right) - \left(\frac{D_2}{H_2} w_2 - \frac{D_3}{H_3} w_3 \right) -$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{w_0}{H_2} + \frac{w_0}{H_3}\right)P_{dc2} - \frac{w_0}{H_3}P_{dc1} - \left(\frac{w_0}{H_2} + \frac{w_0}{H_3}\right)P_{ac2} - \\ & \frac{w_0}{H_3}P_{ac1} + \frac{w_0}{H_3}P_{L\Sigma} \end{aligned}$$

假设电机具有均匀阻尼为 $\frac{D_1}{H_1} = \frac{D_2}{H_2} = \frac{D_3}{H_3} = \frac{D}{H}$, 并令

$$\begin{aligned} v_1 = \frac{d}{dt}\dot{w}_{13} = & -\frac{D}{H}\dot{w}_{13} - \frac{1}{T_{d1}}\left(\frac{w_0}{H_1} + \frac{w_0}{H_3}\right)(-P_{dc1} + P_{dcref1}) - \\ & \frac{1}{T_{d1}}\left(\frac{w_0}{H_1} + \frac{w_0}{H_3}\right)u_{dc1} - \frac{w_0}{H_3}\frac{1}{T_{d2}}(-P_{dc2} + P_{dcref2}) - \\ & \frac{w_0}{H_3}\frac{1}{T_{d2}}u_{dc2} - \left(\frac{w_0}{H_1} + \frac{w_0}{H_3}\right)\dot{P}_{ac1} - \frac{w_0}{H_3}\dot{P}_{ac2} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} v_2 = \frac{d}{dt}\dot{w}_{23} = & -\frac{D}{H}\dot{w}_{23} - \frac{1}{T_{d2}}\left(\frac{w_0}{H_2} + \frac{w_0}{H_3}\right)(-P_{dc2} + P_{dcref2}) - \\ & \frac{1}{T_{d2}}\left(\frac{w_0}{H_2} + \frac{w_0}{H_3}\right)u_{dc2} - \frac{w_0}{H_3}\frac{1}{T_{d1}}(-P_{dc1} + P_{dcref1}) - \\ & \frac{w_0}{H_3}\frac{1}{T_{d1}}u_{dc1} - \left(\frac{w_0}{H_2} + \frac{w_0}{H_3}\right)\dot{P}_{ac2} - \frac{w_0}{H_3}\dot{P}_{ac1} \end{aligned} \quad (13)$$

则原非线性系统最终可转换为以新坐标系 Z 所表述的线性化标准型系统为 $\dot{z}_1 = z_2, \dot{z}_2 = z_3, \dot{z}_3 = v_1, \dot{z}_4 = z_5, \dot{z}_5 = z_6, \dot{z}_6 = v_2$ 。其输出方程为 $y_1 = z_1, y_2 = z_4$, 也是标准的线性系统, 根据线性最优控制理论, 该系统的最优控制规律为

$$v_1 = -z_1 - 2.4142z_2 - 2.4142z_3 \quad (14)$$

$$v_2 = -z_4 - 2.4142z_5 - 2.4142z_6 \quad (15)$$

求解式(12)、(13)可得 2 个直流系统非线性附加控制器的稳定控制规律为

$$\begin{aligned} u_{dc1} = & -\left\{ \left[v_1 + \frac{D}{H}\dot{w}_{13} + \frac{w_0}{H_3}P_{dc2} + \frac{w_0}{H_3}\dot{P}_{ac2} \right] / \left[\frac{1}{T_{d1}} \right. \right. \\ & \left. \left. \left(\frac{w_0}{H_1} + \frac{w_0}{H_3} \right) \right] \right\} - T_{d1}\dot{P}_{ac1} + P_{dc1} - P_{dcref1} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} u_{dc2} = & -\left\{ \left[v_2 + \frac{D}{H}\dot{w}_{23} + \frac{w_0}{H_3}P_{dc1} + \frac{w_0}{H_3}\dot{P}_{ac1} \right] / \left[\frac{1}{T_{d2}} \right. \right. \\ & \left. \left. \left(\frac{w_0}{H_2} + \frac{w_0}{H_3} \right) \right] \right\} - T_{d2}\dot{P}_{ac2} + P_{dc2} - P_{dcref2} \end{aligned} \quad (17)$$

至此, 式(14)~(17)给出了系统的完整控制规律。

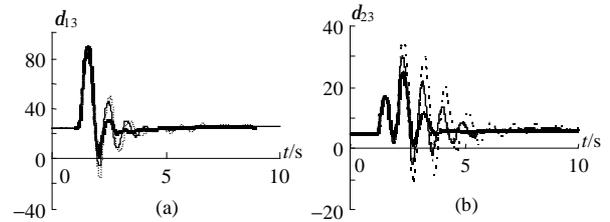
4 仿真分析

以图 1 所示的 3 机双直流系统为例, 对于式(14)~(17)为控制规律的非线性附加控制器的控制效果进行计算机仿真研究。

首先考察的扰动方式为: 在与第一条直流线路并行的交流线路 $D-E$ 上靠近母线 D 处发生 100ms

的三相短路, 相当于在第一条直流线路的整流侧发生三相瞬时短路。在这种故障下, 比较在无附加控制、传统 PID 附加控制和上述非线性附加控制 3 种不同情况下, 发电机 G_1 与 G_3 的相对功角 d_{13} 以及发电机 G_2 和 G_3 的相对功角 d_{23} 的变化趋势。仿真结果图 3 所示, 由图 3 可以看出, 使用传统 PID 结构的附加控制器较之无附加控制器的情形, 系统的暂态稳定性略有提高, 在抑制相对功角 d_{23} 的振荡上效果较为明显, 而对相对功角 d_{13} 振荡的抑制作用较弱。而采用非线性附加控制时, 对 2 组相对功角的振荡均起到了良好的抑制作用; 与传统的 PID 附加控制相比也具有较大的优越性。

为了进一步探讨本文所设计的非线性附加控制器的有效性和鲁棒性, 以下对故障发生在不同地点的情况进行进一步的仿真分析。选取比较具有代表性的 2 个故障发生点: ①第 2 条直流线路的逆变侧母线 H 处发生 100ms 的三相瞬时短路故障; ②距 2 条直流线路较远的母线 F 处发生 100ms 的三相瞬时短路故障。对以上故障的仿真结果如图 4~5 所示。从图中可以看出, 在不同的故障情况下, 非线性控制均能表现出优于传统 PID 控制的性能。能够较大幅度地抑制发电机之间相对功角的振荡, 即使在故障点离直流线路较远的情况下也能起到良好的作用。由此可见非线性附加控制器对故障发生地点的变化具有较强的适应性和鲁棒性。



注: 图中 - 为无附加控制; — 为传统 PID 附加控制; - - 为非线性附加控制。下图同。

图 3 母线 D 处三相瞬时故障时系统响应
Fig. 3 System responses with a temporary

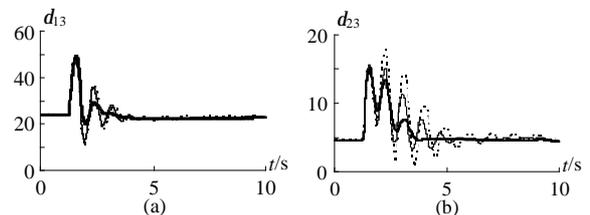


图 4 母线 H 处三相瞬时故障时系统响应
Fig. 4 System responses with a temporary three-phase fault at bus H

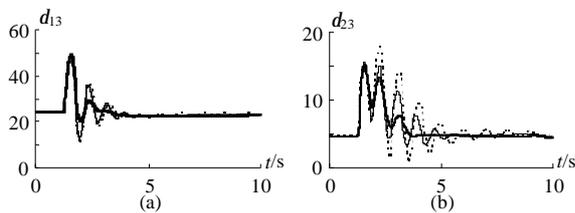


图 5 母线 F 处三相瞬时故障时系统响应
Fig. 5 System responses with a temporary three-phase fault at bus F

5 结论

本文针对含有 2 条直流输电线路的交、直流互联系统设计了非线性附加控制器。从非线性控制规律中可以看出,在一条直流输电系统附加控制器的稳定控制规律中包含有另一条直流系统的信息,因此,所推导出的稳定控制规律考虑到了一个直流系统的控制对另一个直流系统特性的影响,2 个控制系统之间不会相互冲突。仿真结果也证明了该控制规律的有效性。

从非线性稳定控制规律表达式可以看出,该控制器对网络结构与参数的变化具有较强的适应性和鲁棒性,其结构简单,借助计算机技术的发展,实现起来较为容易,因此使用非线性附加控制器具有可行性。即使对于复杂的交、直流互联电力系统,只要将某一地区的大容量复杂电力系统等值成为等值发电机,即将系统的网络结构简化,就可以很方便地通过上述方法设计出适用于该系统的直流系统非线性附加控制器,控制规律中难以测得的转速差可以用交流母线电压的频差来代替。因此将该非线性稳定控制规律应用于实际工程中具有一定的可行性。

参考文献

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统的运行与控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 刘红超, 李兴源. 基于 Prony 辨识的交直流并联输电系统直流阻尼控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 54-57.
Liu Hongchao, Li Xingyuan. Study on damping control for AC/DC transmission systems based on prony-identification [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 54-57.
- [3] 荆勇, 任震, 李柏青, 等. 天广交直流混合系统输电能力的研究[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 52-55.
Jing Yong, Ren Zhen, Li bai-qing *et al.* Research on transmission capability of Tian-Guang AC and DC hybrid system[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 52-55.
- [4] 鲜艳霞, 李兴源. 提高交直流系统暂态稳定性的最优变目标控制

策略[J]. 中国电力, 2004, 37(11): 15-18.

- Xun Yanxia, Li Xingyuan. Optimal variable aim control strategy for improving transient stability of AC/DC systems[J]. Electric Power, 2004, 37(11): 15-18.
- [5] 鲜艳霞, 李兴源. HVDC 与发电机励磁的非线性综合控制策略[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 32-35.
Xun Yanxia, Li Xingyuan. Integrated control strategy for HVDC transmission systems and excitation of generators[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 32-35.
- [6] Denis L H A, Andersson G. Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12 (3): 1309-1318.
- [7] Denis L H A, Andersson G. Power stability analysis of multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(3): 923-931.
- [8] Denis L H A, Andersson G. Use of participation factors in modal voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13 (1): 203-211.
- [9] Li X Y. A nonlinear emergency control strategy for HVDC transmission systems[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 67: 153-159.
- [10] 颜泉, 李兴源, 刘红超, 等. 多馈入交直流系统关联测量分散协调控制[J]. 电工技术学报, 2004, 19(12): 42-46.
Yan Quan, Li Xingyuan, Liu Hongchao *et al.* Decentralized coordinated control of multi-infeed HVDC based on correlative measured vectors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(12): 42-46.
- [11] 刘红超, 李兴源, 王路, 等. 多馈入直流输电系统中直流调制的协调优化[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 5-9.
Liu Hongchao, Li Xingyuan, Wang Lu *et al.* Coordination and optimization of HVDC modulations in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 5-9.
- [12] 毛晓明, 管霖, 张尧, 等. 含有多馈入直流的交直流混合电网高压直流建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 68-73.
Mao Xiaoming, Guan Lin, Zhang Yao *et al.* Researchs on HVDC modeling for AC/Dc hybrid grid with multi-infeed HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 68-73.
- [13] 徐光虎, 王杰, 陈陈, 等. 基于微分代数模型的 AC/DC 系统控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 54-57.
Xu Guanghu, Wang jie, Chen Chen *et al.* Design of nonlinear controller for AC/Dc power system based on differential algebraic models [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 54-57.
- [14] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993.

收稿日期: 2005-04-19。

作者简介:

李兴源 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析、稳定和控制、高压直流输电的研究;

陈凌云 (1979-), 女, 硕士, 主要从事高压直流输电的研究。