

高压直流输电系统的非线性附加控制器设计

温苾芳¹, 陈 可²

(1 中国建筑西南设计研究院, 四川 成都 610081; 2 中铁二院电化院, 四川 成都 610000)

摘 要:针对包含两条直流输电线路的交直流互联系统,采用状态反馈精确线性化方法与线性系统的变结构控制理论相结合的方法,同时设计了两条直流线路的非线性变结构附加控制器。最后对系统进行仿真,其仿真结果表明所设计控制器能够很好的抑制发电机功角振荡,有效地提高系统的暂态稳定性,达到良好的控制效果。

关键词:高压直流输电;附加控制;非线性;状态反馈精确线性化;变结构控制

Abstract: An AC/DC system that includes two DC lines is considered. Based on feedback linearization in nonlinear system and the theory of variable structure control in linear system, two new nonlinear additional controllers are designed at the same time. And the simulation result shows that the controllers can damp the power angle oscillation of generator effectively and improve the stability of AC/DC system, which obtains a better control result.

Key words: HVDC transmission; additional control; nonlinear; feedback linearization; variable structure control

中图分类号: TM763 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)04-0013-04

0 引 言

与交流输电相比,直流输电线路造价低、年电能损失小、输送容量大、短路电流小、带有快速调制功能、它能比交流输电更好地满足西电东送、全国连网等要求。在高压直流输电系统中,基本控制方式下,直流联络线缓冲了一个受扰动的交流系统对另一个交流系统的影响;但它也阻碍了有利于维持交流系统稳定的同步功率的传输。实际上从交流系统看来,直流换流器是一个对频率不敏感的负荷,这可能产生系统摇摆的负阻尼。因此常常需要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。

针对上述问题,则应用非线性理论^[1]和变结构控制理论^[2],提出了对 HVDC 系统中附加控制器的设计和研究。通过仿真表明所设计的控制器鲁棒性强,能有效地提高系统的暂态稳定性,很好地抑制发电机之间相对功角的振荡。

1 HVDC 的系统综合数学模型

考察一个如图 1 所示的多机系统^[3]。

对所仿真的系统图 1 中发电机采用二阶模型,假设输入的机械功率恒定,选取其中两台发电机(G1、

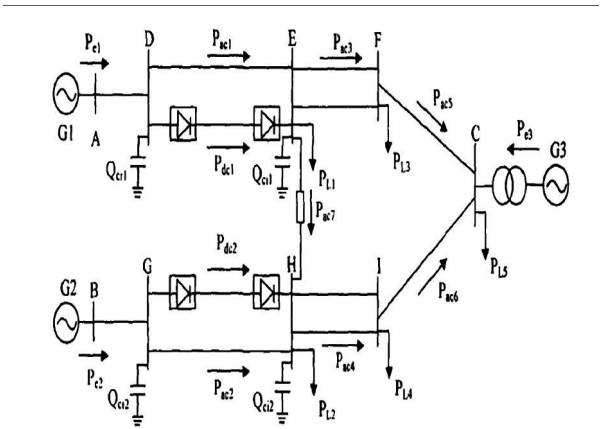


图 1 综合系统模型

G2)与另一台发电机 G3 的功角和转速差来考察,多机系统的动态模型^[3]为式(1)。

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{13} = \omega_{13} \\ \omega_{13} = \left[\frac{\omega_0}{H_1} P_{m1} \frac{\omega_0}{H_3} P_{m3} \right] - \left[\frac{D_1}{H_1} \omega_1 \frac{D_3}{H_3} \omega_3 \right] - \left[\frac{\omega_0}{H_1} P_{l1} \frac{\omega_0}{H_3} P_{l3} \right] \\ \dot{\delta}_{23} = \omega_{23} \\ \omega_{23} = \left[\frac{\omega_0}{H_2} P_{m2} \frac{\omega_0}{H_3} P_{m3} \right] - \left[\frac{D_2}{H_2} \omega_2 \frac{D_3}{H_3} \omega_3 \right] - \left[\frac{\omega_0}{H_2} P_{l2} \frac{\omega_0}{H_3} P_{l3} \right] \\ \dot{P}_{dc1} = \frac{1}{T_{dc1}} (-P_{dc1} + P_{lcref1} + u_{dc1}) \\ \dot{P}_{dc2} = \frac{1}{T_{dc2}} (-P_{dc2} + P_{lcref2} + u_{dc2}) \end{cases} \quad (1)$$

其中,

$$\frac{D_1}{H_1} \rightarrow \frac{D_2}{H_2} \rightarrow \frac{D_3}{H_3} \rightarrow \frac{D}{H} = 0.3$$

设

$$\begin{aligned} p_{e1} &= p_{ac1} + p_{ic1} \\ p_{e2} &= p_{ac2} + p_{ic2} \\ p_{e3} &= p_{e5} - p_{ac5} - p_{ac6} \\ p_{ac5} &= p_{ac3} - p_{e3} \\ p_{ac6} &= p_{ac4} - p_{e4} \\ p_{ac3} &= p_{ac1} + p_{ic1} - p_{e1} - p_{ac7} \\ p_{ac4} &= p_{ac2} + p_{ic2} - p_{e2} + p_{ac7} \\ p_{\Sigma} &= p_{e1} + p_{e2} + p_{e3} + p_{e4} + p_{e5} \end{aligned}$$

根据设计目的,选取发电机相对运行角的增量作为控制系统的输出。

$$\begin{aligned} y_1 &= h_1(x) = \delta_{13} - \delta_{130} \\ y_2 &= h_2(x) = \delta_{23} - \delta_{230} \end{aligned} \quad (2)$$

把方程 (1)、(2) 写成仿射非线性方程形式,则为

$$\begin{aligned} \dot{X} &= f(X) + g_1(X) u_{dc1} + g_2(X) u_{dc2} \\ y_1 &= h_1(X) \\ y_2 &= h_2(X) \end{aligned} \quad (3)$$

$$X = [\delta_{13} \quad \omega_{13} \quad \delta_{23} \quad \omega_{23} \quad p_{ic1} \quad p_{ic2}]^T = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6]^T$$

其中,

$$f(X) = \begin{bmatrix} \left[\frac{\omega_0}{H_1} p_{m1} - \frac{\omega_0}{H_3} p_{m3} \right] - \left[\frac{D_1}{H_1} \omega_1 - \frac{D_3}{H_3} \omega_3 \right] - \left[\frac{\omega_0}{H_1} p_{e1} - \frac{\omega_0}{H_3} p_{e3} \right] \\ \left[\frac{\omega_0}{H_2} p_{m2} - \frac{\omega_0}{H_3} p_{m3} \right] - \left[\frac{D_2}{H_2} \omega_2 - \frac{D_3}{H_3} \omega_3 \right] - \left[\frac{\omega_0}{H_2} p_{e2} - \frac{\omega_0}{H_3} p_{e3} \right] \\ \frac{1}{T_{dcl}} (-p_{ic1} + p_{icref1}) \\ \frac{1}{T_{dc2}} (-p_{ic2} + p_{icref2}) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} g_1(x) &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{T_{d1}} \quad 0]^T \\ g_2(x) &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{T_{d2}}]^T \end{aligned}$$

2 坐标变换

根据仿射非线性系统相对阶的概念,容易验证系统方程的关系度 $r=[r_1 \quad r_2]=[3 \quad 3]$,于是可得 $r=r_1+r_2=6=n$ (n 为关系度总数),即关系度总数等于系统阶数,故精确线性化有解。再根据多输入、多输出精确线性化设计原理及映射坐标选择原则,将原非

线性系统通过恰当的坐标变换,进行线性化。可得原系统线性化的坐标变换 $Z=\Phi(X)$ 为

$$\begin{aligned} z_1 &= \varphi_1(X) = h_1(X) = \delta_{13} - \delta_{130} \\ z_2 &= \varphi_2(X) = L_f h_1(X) = \dot{f}_1 = \omega_{13} \\ z_3 &= \varphi_3(X) = L_f^2 h_1(X) = \dot{f}_2 = \omega_{13} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_0}{H_1} p_{m1} - \frac{\omega_0}{H_3} p_{m3} \\ - \left[\frac{D_1}{H_1} \omega_1 - \frac{D_3}{H_3} \omega_3 \right] - \left[\frac{\omega_0}{H_1} p_{e1} - \frac{\omega_0}{H_3} p_{e3} \right] \end{bmatrix} \\ z_4 &= \psi_1(X) = h_2(X) = \delta_{23} - \delta_{230} \\ z_5 &= \psi_2(X) = L_f h_2(X) = \dot{f}_3 = \omega_{23} \\ z_6 &= \psi_3(X) = L_f^2 h_2(X) = \dot{f}_4 = \omega_{23} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_0}{H_2} p_{m2} - \frac{\omega_0}{H_3} p_{m3} \\ - \left[\frac{D_2}{H_2} \omega_2 - \frac{D_3}{H_3} \omega_3 \right] - \left[\frac{\omega_0}{H_2} p_{e2} - \frac{\omega_0}{H_3} p_{e3} \right] \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

容易检验向量函数 $\Phi(x)$ 的 Jacobian 矩阵是非奇异的,于是可知所选的坐标变换是一组合格的局部微分同胚。

在坐标变换 (4) 关系下,系统 (3) 的状态方程可转化成如下形式。

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = v_1 \\ \dot{z}_4 = z_5 \\ \dot{z}_5 = z_6 \\ \dot{z}_6 = v_2 \end{cases} \quad (5)$$

输出方程为

$$\begin{aligned} y_1 &= h_1(Z) = z_1 \\ y_2 &= h_2(Z) = z_4 \end{aligned}$$

其中, v 为同步电机反馈线性化后的“虚拟输入量”,且有

$$\begin{aligned} v_1 &= -\frac{D}{H} \dot{\omega}_{13} - \frac{1}{T_{d1}} \left(\frac{\omega_0}{H_1} + \frac{\omega_0}{H_3} \right) (-p_{ic1} + p_{icref1}) - \frac{1}{T_{d1}} \left(\frac{\omega_0}{H_1} + \frac{\omega_0}{H_3} \right) u_{dc1} - \frac{\omega_0}{H_3 T_{d2}} (-p_{ic2} + p_{icref2}) - \frac{\omega_0}{H_3 T_{d2}} u_{dc2} - \left[\frac{\omega_0}{H_1} + \frac{\omega_0}{H_3} \right] p_{ac1} - \frac{\omega_0}{H_3} p_{ac2} \\ v_2 &= -\frac{D}{H} \dot{\omega}_{23} - \frac{1}{T_{d2}} \left(\frac{\omega_0}{H_2} + \frac{\omega_0}{H_3} \right) (-p_{ic2} + p_{icref2}) - \frac{1}{T_{d2}} \left(\frac{\omega_0}{H_2} + \frac{\omega_0}{H_3} \right) u_{dc2} - \frac{\omega_0}{H_3 T_{d1}} (-p_{ic1} + p_{icref1}) - \end{aligned}$$

$$\frac{\omega_0}{H_3 T_{d1}} u_{ic1} - \left[\frac{\omega_0}{H_2} + \frac{\omega_0}{H_3} \right] \cdot P_{ac2} - \frac{\omega_0}{H_3} P_{ac1}$$

将系统写成状态方程形式,得

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + Bv \\ y = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

其中,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3 滑模控制器的设计

系统 (6) 是个标准的线性简约型, 对系统 (6) 进行滑模控制设计, 可把系统 (6) 转化为

$$\begin{cases} \dot{Z}_I = A_{I1} Z_I + A_{I2} Z_{II} + B_1 v \\ \dot{Z}_{II} = A_{E1} Z_I + A_{E2} Z_{II} + B_2 v \end{cases}$$

其中,

$$\begin{aligned} Z_I &= [z_1 \ z_2 \ z_3]^T, \quad Z_{II} = [z_4 \ z_5 \ z_6]^T, \\ A_{I1} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{I2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ A_{E1} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{E2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ B_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

分别取指数趋近率得

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= -\epsilon_1 \operatorname{sgn} s_1 - k_1 s_1, \quad \epsilon_1 > 0, \quad k_1 > 0 \\ \dot{s}_2 &= -\epsilon_2 \operatorname{sgn} s_2 - k_2 s_2, \quad \epsilon_2 > 0, \quad k_2 > 0 \end{aligned}$$

选取切换函数为

$$s = Cz \quad (7)$$

其中, C 为一矩阵。

任取一组期望闭环极点 $\{-2 \pm j, -1 \pm j, -1 \pm j\}$, 根据极点配置方法, 可得出

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 50 & 110 & 121 & 78 & 32 & 8 \end{bmatrix}$$

为了得到更好的动态品质, 选取指数趋近律得

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= -\epsilon_1 \operatorname{sgn} s_1 - k_1 s_1, \quad \epsilon_1 > 0, \quad k_1 > 0 \\ \dot{s}_2 &= -\epsilon_2 \operatorname{sgn} s_2 - k_2 s_2, \quad \epsilon_2 > 0, \quad k_2 > 0 \end{aligned} \quad (8)$$

可得

$$v_1 = z_5 - \epsilon_1 \operatorname{sgn} s_1 - k_1 s_1 \quad (9)$$

$$v_2 = -50 z_2 - 110 z_3 - 78 z_4 + 32 z_5 - \epsilon_2 \operatorname{sgn} s_2 - k_2 s_2$$

为了抑制滑模面上抖动, 此处采用饱和函数代替式 (9) 中的符号函数。

$$\operatorname{sat}(s/\Delta) = \begin{cases} 1 & s > \Delta \\ s/\Delta & |s| \leq \Delta \\ -1 & s < -\Delta \end{cases}$$

所以, 式 (9) 可写为

$$v_1 = z_5 - \epsilon_1 \operatorname{sat}(s_1/\Delta) - k_1 s_1$$

$$v_2 = -50 z_2 - 110 z_3 - 78 z_4 + 32 z_5 - \epsilon_2 \operatorname{sat}(s_2/\Delta) - k_2 s_2$$

4 仿真分析

为了验证所设计非线性附加控制器的有效性, 对图 1 所示的三机系统进行了动态仿真。系统参数如

下: $H_1 = H_2 = 6, H_3 = 12, \frac{D_1}{H_1} = \frac{D_2}{H_2} = \frac{D_3}{H_3} = \frac{D}{H} = 0.3, T_{d1} = 0.1, T_{d2} = 0.06, \epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.1, k_1 = k_2 = 5, \Delta = 0.2, \omega_0 = 314.16, \delta_{130} = 60^\circ, \omega_{130} = 0, \delta_{230} = 30^\circ, \omega_{230} = 0, P_{dref1} = 0.65, P_{dref2} = 0.55$ 。

在系统运行中, 1 s 时刻, 第一条交流线路 DE 中靠近逆变侧的一点发生三相短路, 0.15 s 后排除故障恢复线路供电, 系统的动态响应曲线如图 2、3。

该图为非线性变结构附加控制功角响应曲线, 从仿真结果可以看出, 控制明显增强了系统的阻尼, 在大扰动情况下, 对两组相对功角的振荡均起到良好的抑制效果, 迅速趋向相应的故障后系统平衡状态, 保持系统的稳定性, 具有较好的鲁棒性。

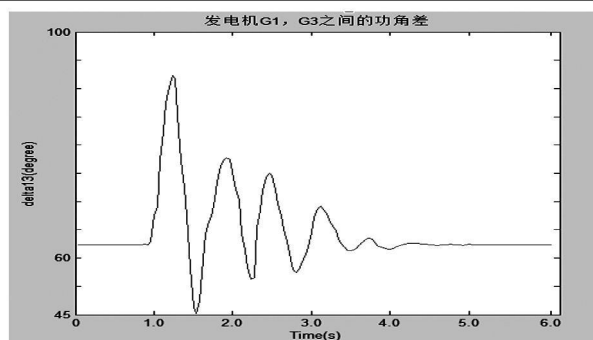


图 2 功角 13 响应曲线

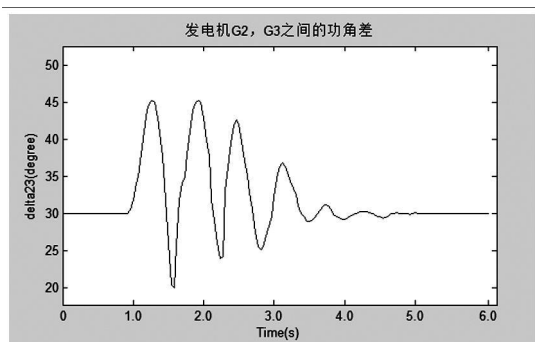


图 3 功角 δ_{23} 响应曲线

5 结 论

采用非线性系统理论以及变结构控制理论相结合,设计出以提高系统暂态稳定性为目标的控制规律。通过对系统进行仿真,所设计的非线性变结构附加控制器在系统受到大的扰动时,能够很好地抑制发电机之间相对功角的振荡,有较强的适应性和鲁棒性,达到良好的控制效果。

参考文献

- [1] 卢强,孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京:科学出版社, 1993.
- [2] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法 [M]. 北京:科学出版社, 1996.
- [3] 陈凌云. 高压直流输电系统中非线性控制策略的研究 [D]. 四川大学, 2003.
- [4] 陈凌云,李兴源,刘红超,邱晓燕. 高压直流输电系统非线性变结构控制器的设计 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 6—9.
- [5] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京:科学出版社, 1998.
- [6] 任震. 高压直流输电 [M]. 重庆:重庆大学出版社, 1987.
- [7] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析 [M]. 北京:机械工业出版社, 2004.

作者简介:

温苾芳 (1985—),女,江西东乡,硕士研究生,研究方向为非线性变结构控制理论在电力系统中的应用。

(收稿日期: 2010—04—06)

简阳新悦电力器材有限公司简介

简阳新悦电力器材有限公司 2009 与资阳资源电力集团有限公司合资成立为股份制企业。公司位于简阳市贾家镇老成渝路旁,占地面积 8000 平方米,是一家专业生产销售电力铁塔、铁附件、金具、加工热镀锌的公司。公司注册资金 200 万元人民币,固定资产 600 万元,现有员工 70 人,我公司具有一流的生产设备和先进的生产工艺。公司于 2009 年 11 月通过了 GB/T 19001—2008 质量管理体系认证。

公司拥有各类生产设备 26 台,起吊、运输工具 6 台,年生产销售产值 6000 余万元。公司始终坚持以“客户的需求、产品的质量、快捷的服务”为企业生存的根本条件,公司全体员工遵循科学、严谨、务实的企业作风,奉行“观念求新、技术领先、管理从严、服务至诚”的经营宗旨。

公司企业文化:言必行,行必果。

我们的追求:事事领先同行。

我们的愿景:做行业第一,创国内一流企业。

公司全体员工真诚期待全国各界朋友与我公司洽谈合作共创辉煌!

联系人:杨 杰

电 话:028—27921888

传 真:028—27926295