

提高暂态稳定性的 HVDC 与发电机励磁的非线性最优协调控制

鲜艳霞, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对大扰动情形, 为进一步提高交直流混合电力系统的暂态稳定性, 提出了一种高压直流输电 (HVDC) 与发电机励磁协调的控制方法。通过建立 HVDC 系统与发电机的综合模型, 将现代控制理论中直接反馈线性化方法与线性系统最优控制理论相结合, 设计出一种 HVDC 与发电机励磁协调的非线性最优控制规律。仿真结果表明, 该协调控制器能明显提高交直流互联系统的功角稳定性和频率稳定性, 改善直流系统的性能。

关键词: 协调控制; 高压直流输电; 励磁控制

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)20-0001-04

0 引言

高压直流输电系统具有高度可控, 调节迅速, 传输功率大, 运行灵活等特点, 在远距离大容量输电, 区域电力系统互联等方面运用广泛。利用 HVDC 系统快速控制潮流的固有能力的提高交直流系统的动态性能已经取得相当的成果^[1,2], 也有一些文献利用 HVDC 进行大干扰的研究^[3~5], 但较少考虑系统中其它控制器的相互影响。而在实际中, 系统发生故障后往往需要多个控制器一起协调工作才能达到良好效果, 因而多种控制器的协调问题越来越引起人们的关注^[6~9]。

另一方面, 作为一种传统的控制手段, 励磁控制由于其有效性和经济性, 在电力系统稳定控制中一直发挥着重要作用。大量的文献研究了 FACTS 控制器与传统励磁控制结合起来改善电力系统的性能^[7~9], 而关于 HVDC 与励磁协调控制方面的研究还不多。

针对以上问题, 本文通过建立综合模型, 研究了单机无穷大系统中 HVDC 功率调制和发电机励磁的协调控制问题。首先采用直接反馈线性化方法将被控系统线性化, 再运用线性最优控制理论, 设计了以提高系统暂态稳定性为目的的协调控制规律, 减小由于单个控制器的局部优化控制效果而导致系统其它部分或者整个系统性能恶化的可能。仿真表明, HVDC 及其附近的发电机励磁协调控制后, 能更进一步的提高整个交直流系统的功角稳定性和频率

稳定性, 同时改善直流系统的性能。

1 交直流综合建模

1.1 HVDC 的功率调节作用^[5]

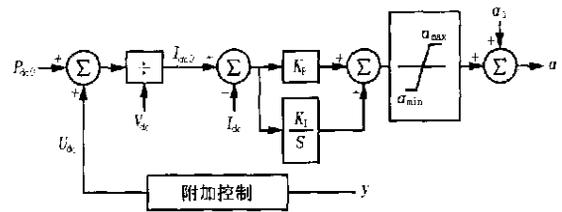


图 1 电流控制器及其附加控制

Fig. 1 Diagram of current controller and its supplementary control

在交直流混合系统中, 高压直流输电系统的基本控制通常采用整流侧定电流控制, 逆变侧定熄弧角控制。这种控制方式下的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, 但同时阻碍了有利于维持交流系统稳定的同步功率的传输。因此需要附加控制来拓展直流联络线的控制能力, 提高交直流系统的动态性能。

附加功率控制能够对交流系统功率振荡提供阻尼, 增加交直流系统的暂态稳定性, 在实际工程中使用较多。当采用附加功率控制时, 将功率指令除以直流电压换算成电流指令, 实际上是通过定电流的方式完成。由于直流系统响应的速度很快, 在研究交直流稳定控制的时候, 可忽略其动态特性, 近似地认为, 通过控制可以立刻调节直流功率:

$$P_{dc} = P_{dc0} + u_{dc} \quad (1)$$

式中: P_{dc0} 为未控制之前的直流功率, u_{dc} 为直流系统控制量。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50377017)

1.2 综合模型

考察一个单机无穷大交直流联络线并行系统，C为无穷大母线。

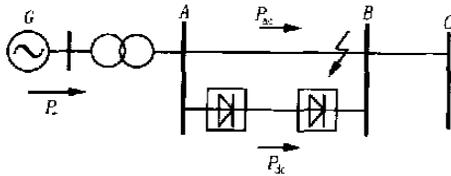


图2 单机无穷大系统

Fig.2 Single-machine infinite bus system

由图2可以看出,发电机的电磁功率 P_e 与各线路功率存在如下关系:

$$P_e = P_{ac} + P_{dc} \quad (2)$$

发电机采用含励磁动态的三阶模型,输入机械功率 P_m 恒定,采取快速静止可控硅励磁方式,可得到系统状态方程:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{H} \left[P_m - \frac{D(\omega - \omega_0)}{0} - P_e \right] \\ \dot{E}_q &= \frac{1}{T_{d0}} (-E_q - (x_d - x_d') I_d + u_f) \end{aligned} \quad (3)$$

其中: δ 为发电机转子角, ω 为角速度, ω_0 为额定转速, H 为转动惯量, D 为阻尼系数, E_q 为发电机 q 轴暂态电势, x_d, x_d' 为电机电抗, I_d 为 d 轴电枢电流, u_f 为发电机励磁电压, T_{d0} 为励磁绕组时间常数。

一般认为,在受到干扰之后,发电机相对转子角越小,功角稳定性越高;相对角速度越小,频率稳定性越高。故从提高全系统暂态稳定性出发,采取以下控制目标输出:

$$\begin{aligned} y_1 &= \delta - \delta_0 \\ y_2 &= \omega - \omega_0 \end{aligned} \quad (4)$$

综合式(1)~(4)即为本次非线性最优协调控制设计中,针对所采用的单机无穷大系统而建立的数学模型。

2 非线性最优协调控制器的设计

2.1 直接反馈线性化

可以看出,所讨论的是个复杂的非线性系统,直接求解控制变量 u_{dc}, u_f 十分困难。本文将采用直接反馈线性化^[9]方法使问题求解简单化。其基本思路是:对于给定的多输入多输出非线性控制系统 $\dot{X} = f(X) + g(X)U$,通过坐标变换 $Z = Z(X)$,以及设置预反馈 $V = C(X) + D(X)U$,使得原系统变为一个完全能控的线性系统 $\dot{Z} = AZ + BV$ 。

对于本文设计的非线性控制系统,选择变换坐标为:

$$\begin{aligned} z_1 &= \delta - \delta_0 \\ z_2 &= \omega - \omega_0 \\ z_3 &= E_q \end{aligned} \quad (5)$$

在新坐标中,系统变换为以下形式:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= \frac{1}{H} \left[P_m - \frac{D(\omega - \omega_0)}{0} - P_{ac} - P_{dc0} - u_{dc} \right] \\ \dot{z}_3 &= -\frac{1}{H} \left[P_e + \frac{D}{0} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\dot{z}_3 = -\frac{1}{H} \left[P_e + \frac{D}{0} \right]$$

设置预反馈为:

$$\begin{aligned} v_{dc} &= \frac{1}{H} \left[P_m - \frac{D(\omega - \omega_0)}{0} - P_{ac} - P_{dc0} - u_{dc} \right] \\ v_f &= -\frac{1}{H} \left[P_e + \frac{D}{0} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

其中:根据发电机内部的电量关系,电磁功率也可以表示为:

$$P_e = E_q I_q + (x_q - x_d) I_d I_q$$

求导得:

$$\dot{P}_e = \dot{E}_q I_q + E_q \dot{I}_q + (x_q - x_d) \dot{I}_d I_q + (x_q - x_d) I_d \dot{I}_q \quad (8)$$

综合式(4)~(7)可以得到标准化的线性系统:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= v_{dc} \\ \dot{z}_3 &= v_f \\ y_1 &= z_1 \\ y_2 &= z_2 \end{aligned} \quad (9)$$

其中: v_{dc}, v_f 可以看作线性化后系统式(9)的虚拟控制量。综合式(3)、(7)、(8),可以看出它们分别是含有原非线性系统控制量 u_{dc}, u_f 的函数。故,由 v_{dc}, v_f 的表达式可反解出 u_{dc}, u_f 的表达式:

$$\begin{aligned} u_{dc} &= -\frac{Hv_{dc} + D(\omega - \omega_0)}{0} + P_m - P_{ac} - P_{dc0} \\ u_f &= E_q + (x_d - x_d') I_d - \frac{T_{d0}}{I_q} [E_q + (x_q - x_d) I_d] \dot{I}_q - \\ &\quad \frac{T_{d0} H v_f}{0 I_q} - \frac{T_{d0} D}{0 I_q} - T_{d0} (x_q - x_d) \dot{I}_d \end{aligned} \quad (10)$$

不难看出,只要求得线性化后系统的虚拟控制量 v_{dc}, v_f 再带入式(10)即可得到原非线性系统的完

整控制规律。

2.2 最优控制

要求解线性化后系统式(9)的虚拟控制量 v_{dc} , v_f , 可以利用发展得很成熟并在实际中广泛应用的线性最优控制理论来设计线性二次型最优控制规律。对于给定的线性系统:

$$\dot{Z} = AZ + BV$$

$$Y = CZ$$

首先建立二次型指标, $J = \int_0^{\infty} (Z^T QZ + V^T RV) dt$, Q 为正定或半正定, R 正定。使得性能指标达到极值的 V 称为最优控制:

$$V = -R^{-1}B^T PZ = -KZ$$

对于线性定常系统, P 为 Riccati 方程

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$$

的对称正定解。对于线性系统式(9), 有:

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

经过反复调试和分析获取适当的加权矩阵 Q 、 R , 可求得线性系统式(9)的最优控制规律为:

$$\begin{bmatrix} v_f \\ v_{dc} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{21}^* z_1 & k_{22}^* z_2 & k_{23}^* z_3 \\ k_{31}^* z_1 & k_{32}^* z_2 & k_{33}^* z_3 \end{bmatrix}$$

$$k_{21}^* = k_{33}^* = 1, \quad k_{22}^* = 1.7321, \quad k_{23}^* = k_{31}^* = k_{32}^* = 0$$

将其带入式(10), 即可给出原非线性系统完整的最优控制规律:

$$u_f = E_q + (x_d - x_d) I_d - \frac{T_{d0}}{I_q} [E_q + (x_q -$$

$$\frac{T_{d0} D}{0 I_q} - T_{d0} (x_q - x_d) \dot{I}_d$$

$$u_{dc} = \frac{H(k_{31}^* z_1 + k_{32}^* z_2 + k_{33}^* z_3) - D(\quad \quad \quad)}{0} +$$

$$P_m - P_{ac} - P_{dc0}$$

(11)

3 数字仿真

运用所求得的控制规律式(11), 采用大型电力系统仿真软件 NETOMAC 对图 2 所示系统进行动态仿真。采用系统参数参见文献[10]。直流系统的初始运行条件为: 整流器触发滞后角 $\alpha = 15^\circ$; 逆变器关断超前角 $\beta = 18^\circ$ 。

考察与高压直流联络线并行的交流线路在靠近 B 处发生 100 ms 三相短路故障, 比较系统分别在不加任何附加控制, 仅有直流功率调制, 采用非线性最优协调控制的三种不同情况下, 其功角, 转速偏差, 发电机端电压和直流线路功率的变化趋势。

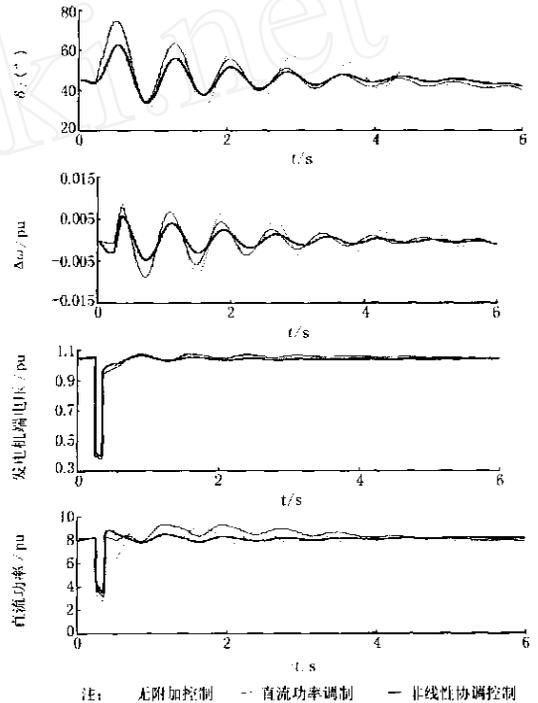


图 3 各种控制的比较

Fig. 3 Comparison of different controllers

由图 3 可见, 较之无附加控制, 在仅有直流功率调制的情况下, 直流系统本身的功率响应有了较好的改善, 系统的暂态稳定性也略有提高, 但对功角和转速偏差振荡的抑制作用较弱, 对于改善机端电压特性上效果不明显; 在采用了非线性协调控制之后, 明显的抑制了功角和转速偏差的振荡, 机端电压波动也得到改善, 较好的提高了系统的暂态稳定性, 同时较之仅有直流功率调制, 直流系统本身的功率振荡得到了进一步的抑制。

4 结论

研究了高压直流输电系统与发电机励磁协调的非线性最优控制问题, 目的在于提高系统暂态稳定性, 同时减小由于单个控制器局部优化而引起系统其它性能下降的可能。首先建立了考虑发电机励磁的交直流综合模型, 在此基础上, 基于直接反馈线性化和最优控制理论, 构造了非线性最优协调控制规

律。仿真结果证明,所设计的协调控制器可以较好的提高交直流系统的功角稳定性和频率稳定性,改善直流系统本身的性能。

参考文献:

- [1] 李兴源(LI Xing-yuan). 高压直流输电系统的运行和控制(The Operating and Control of HVDC System) [M]. 北京: 科学出版社(Beijing: Science Press), 1998.
- [2] Jovicic D, Pahalawaththa N, Zavahir M. Novel Current Controller Design for Elimination of Dominant Oscillatory Mode on an HVDC Line[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(2): 543-548.
- [3] Jones L E, Bourles H, Anderson G. Nonconventional Control of HVDC Using the LQG/LTR Methodology[J]. IEEE Power Engineering Review, 1999, 19(1): 62-64.
- [4] Machida T. Improving Transient Stability of AC Systems by Joint Usage of DC System[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1966, 85(3): 226-232.
- [5] 李兴源,刘红超,邱晓燕,等(LI Xing-yuan, LIU Hongchao, QIU Xiao-yan, et al). 改善暂态稳定性的 HVDC 非线性控制策略(A Nonlinear Control Strategy of HVDC for Improving Transient Stability of Power Systems) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(14): 16-19.
- [6] Yamaji K, Sato M, Kato K. Cooperative Control between Large Capacity HVDC System and Thermal Power Plant[M]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 629-634.
- [7] 陈菊民,梅生伟,卢强,等(CHEN Jurmin, MEI Shengwei, LU Qiang, et al). 多机系统中 TCSC 设备与发电机励磁的分散协调(Decentralized Coordinated Control of TCSC and Excitation in Multiple Machine System Based on Robust Control Theory) [J]. 清华大学学报(Journal of Tsinghua University), 2001, 41(4): 136-141.
- [8] 康忠健,陈学允(KANG Zhongjian, CHEN Xue-yun). SVC 与发电机励磁的非线性状态 PI 协调控制(Nonlinear State PI Control for Static Var Compensator Coordinating with Excitation System of Generator) [J]. 电网技术(Power System Technology), 2001, 25(2): 30-34.
- [9] 马幼捷(MA Youjie). SVC 与发电机励磁协调非线性控制(The Nonlinear Control of SVC Coordinate with the Excitation System of Generator) [J]. 电工技术学报(Transactions of China Electrotechnical Society), 1998, 13(4): 1-4.
- [10] 卢强,孙元章(LU Qiang, SUN Yuanzhang). 电力系统非线性控制(Nonlinear Control of Power System) [M]. 北京: 科学出版社(Beijing: Science Press), 1993.

收稿日期: 2004-02-27; 修回日期: 2004-03-18

作者简介:

鲜艳霞(1980-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: enyakey@sina.com

李兴源(1945-), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 中国电机工程学会理事, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制等。

An optimal nonlinear coordinated control of HVDC and generator excitation to improve transient stability of power system

XIAN Yan-xia, LI Xing-yuan

(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A coordinated control of HVDC and generator excitation to improve transient stability of AC/DC systems in the presence of large disturbance is presented in this paper. First, a model including HVDC and generator excitation is developed. Then, based on the direct feed back linearization method of nonlinear systems and the optimal control theory of linear systems, a rule of nonlinear optimal coordinated control for HVDC and generator excitation is derived. The simulation results of a single machine infinite bus system show that the proposed method can improve not only the power angle and the frequency stability of AC/DC systems, but also the performance of DC systems.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 50377017).

Key words: coordinated control; HVDC; excitation control