

交直流混合输电系统的新型无源性调制

钟 庆, 张 尧, 吴 捷, 杨金明, 武志刚

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 交直流混合输电系统的动态响应性能直接影响电力系统的稳定性. 为提高系统的动态响应速度和控制器的鲁棒性, 本文基于无源性理论从具体结构出发, 设计了直流输电系统的无源性调制控制器. 以交直流并联的两机系统为研究对象, 对系统的输入输出进行重构, 并对系统的无源性进行验证. 根据稳定性和无源性之间的关系, 设计出反馈控制规律. 对两种不同情况的仿真, 显示出该控制律在保证系统的稳定性的同时, 提高了系统的动态响应速度.

关键词: 交直流输电系统; 直流调制; 无源性

中图分类号: TM7 **文献标识码:** A

Passivity-based modulation of hybrid AC-DC transmission systems

ZHONG Qing, ZHANG Yao, WU Jie, YANG Jin-ming, WU Zhi-gang

(College of Electrical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: The dynamic performance of the AC-DC transmission system plays a key role in the stability of a power system. To accelerate the transient response and to improve the controller robustness, we design a passivity-based modulation controller for a DC transmission system, by applying the passivity theory to the construction of the physical system. A parallel 2-generator AC-DC system with reconstructed input and output is taken as the testing object for verifying the passivity. The feedback control strategy is designed based on the relation between passivity and stability. Simulation results of the system in two different disturbance conditions demonstrate the reduction of the transient time, while keeping the stability of the system.

Key words: AC-DC transmission systems; DC modulation; passivity

1 引言(Introduction)

随着西电东送的策略实施和全国联网的实现, 南方电网将成为世界上最大的交直流混合输电系统之一^[1]. 直流输电本身具有快速调节和有一定过载能力和响应速度快的特点, 直流输电系统在稳定交直流混合系统的稳定控制, 尤其是暂态稳定的控制中起着重要的角色^[2].

传统调制方法一般是基于线性控制理论设计, 但高压直流输电(HVDC)系统是一个复杂的非线性系统, 传统控制很难达到预期的效果^[3]. 非线性控制理论的出现, 为直流调制提供了更好的控制方法. 文献[4]首先将微分几何方法应用于HVDC系统. 随后多种非线性控制方法如自适应控制^[5,6]、鲁棒控制^[7], 直接反馈线性化方法^[8]都应用于HVDC系统.

本文采用几何学和分析学相结合的方法, 利用无源性理论^[9], 研究了由交直流混合输电的两机系统, 设计了一种新型的非线性无源控制律, 在能够满足

系统稳定性要求的同时, 提高了系统的动态响应和鲁棒性, 控制策略设计简单且易于实现.

2 系统模型(Problem formulation)

如图1所示的两机系统, 系统模型如下:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i, \\ \dot{\omega}_i = \frac{\omega_0}{H_i} (P_{mi} - \frac{D_i}{\omega_0} \omega_i - P_{ei}), \end{cases} \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

式中: $\delta_i, \omega_i, D_i, H_i, P_{mi}, P_{ei}$ 分别为第*i*机的转角、角速度、阻尼系数、转动惯量、机械功率和电磁功率, ω_0 为系统额定角速度.

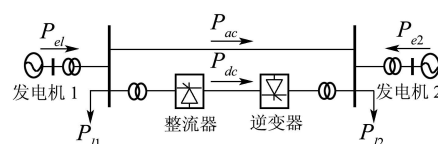


图 1 并联AC-DC系统

Fig. 1 Parallel AC-DC transmission system

如图1所示,各功率之间的关系为

$$\begin{cases} P_{e1} = P_{L1} + P_{dc} + P_{ac}, \\ P_{e2} = P_{L2} - P_{dc} - P_{ac}. \end{cases} \quad (2)$$

系统方程为

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{12} = \omega_{12}, \\ \dot{\omega}_{12} = \\ \left(\frac{\omega_0}{H_1} P_{m1} - \frac{\omega_0}{H_2} P_{m2} \right) - \left(\frac{D_1}{H_1} \omega_1 - \frac{D_2}{H_2} \omega_2 \right) - \\ \left(\frac{\omega_0}{H_1} P_{L1} - \frac{\omega_0}{H_2} P_{L2} \right) - \left(\frac{\omega_0}{H_1} + \frac{\omega_0}{H_2} \right) (P_{ac} + P_{dc}), \end{cases} \quad (3)$$

δ_{12}, ω_{12} 分别为两机的相对转角和角速度.

用状态方程的形式描述系统方程,令 $x_1 = \delta_{12d} - \delta_{12}, x_2 = \omega_{12d} - \omega_{12}, \tilde{P}_{dc} = P_{dc}^{\text{REF}} - P_{dc}, \delta_{12d}, \omega_{12d}$ 为 δ 和 ω 的给定值, P_{dc}^{REF} 为直流功率的额定运行参考值,通常为额定值.则系统可描述为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) - C_1 - C_2 \tilde{P}_{dc}. \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$\begin{cases} C_1 = \left(\frac{\omega_0}{H_1} P_{L1} - \frac{\omega_0}{H_2} P_{L2} \right) - \frac{\omega_0}{H_1} P_{m1} - \\ \frac{\omega_0}{H_2} P_{m2} - \left(\frac{\omega_0}{H_1} + \frac{\omega_0}{H_2} \right) P_{dc}^{\text{REF}}, \\ C_2 = \left(\frac{\omega_0}{H_1} + \frac{\omega_0}{H_2} \right), \\ f(x_1, x_2) = - \left(\frac{D_1}{H_1} \omega_1 - \frac{D_2}{H_2} \omega_2 \right) - \\ \left(\frac{\omega_0}{H_1} + \frac{\omega_0}{H_2} \right) P_{ac}, \end{cases} \quad (5)$$

$f(x_1, x_2)$ 为系统中的非线性项.

3 调制律设计(Control designation)

3.1 基本原理(Principle)

对于一个非线性系统 H :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u), \quad x \in \mathbb{R}^n, \\ y = h(x, u), \quad u, y \in \mathbb{R}^m. \end{cases} \quad (6)$$

耗散性和无源性的定义为^[10]:

假设存在与系统 H 相关的函数 $w: \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ 为系统的供应率,对于任意 $u \in U$ 可积,即 $\int_{t_0}^{t_1} |w(u, y)| dt < \infty, t_0 < t_1$. 令 X 为 $\mathbb{R}^n$ 中包含原点的子集,如果存在一个函数 $S(x), S(0) = 0$,并对任意 $x \in X$ 满足 $S(x) \geq 0$,且 $S(x(T)) - S(x(0)) \leq \int_0^T w(u, y) dt$,其中 $T \geq 0, t \in [0, T]$,则称系 H 是耗散的, $S(x)$ 为存储函数. 当 $w(u, y) = u^T y$,则称系统 H 为无源的.

定理 1 非线性系统 H 为无源的,当且仅当系统 H 为零状态可观的,系统控制律 $u = -y$ 保证系统

是渐近稳定.

零状态可观定义为:当系统 H 的输入为0时,令 $Z \subset \mathbb{R}^m$ 为包含 $\{x \in \mathbb{R}^m \mid y = h(x, 0) = 0\}$ 最大不变集,如果 $x = 0$ 在 Z 内为渐近稳定,则系统 H 为零状态可观的.定理的证明参考文献[10].

3.2 无源性调制律设计(Passivity based modulation)

$u = \tilde{P}_{dc}$ 为交直流混合输电系统的调制量,当 $u = 0$ 时,系统处于稳定运行状态,因此系统满足零输入可观条件.

从物理意义出发可知,系统非线性项 $f(x_1, x_2)$ 满足

$$f(x_1, x_2) \leq -C_3 x_2 - C_4. \quad (7)$$

式中: $C_3 = \max(\frac{D_1}{H_1}, \frac{D_2}{H_2})$, $C_4 = (\frac{\omega_0}{H_1} + \frac{\omega_0}{H_2}) P_{ac \max}$, $P_{ac \max}$ 为交流线路的功率传输极限.取文献[8]定义的Lyapunov函数

$$V = \frac{1}{2}(\lambda_1 x_1^2 + (x_1 \lambda_2 x_2)^2), \quad (8)$$

$\lambda_1, \lambda_2 > 0$ 为待定常数.求其对时间的导数得

$$\dot{V} = (1 + \lambda_1) x_1 x_2 + \lambda_2 x_1 \dot{x}_2 + \lambda_2 x_2^2 + \lambda_2^2 x_2 \dot{x}_2^2. \quad (9)$$

将式(4)(7)代入式(9)得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & (1 + \lambda_1 - \lambda_2 C_3) x_1 x_2 - (C_1 + \\ & C_4) \lambda_2 (x_1 + \lambda_2 x_2) - \lambda_2 (\lambda_2 C_3 - 1) x_2^2 - \\ & \lambda_2 C_2 (x_1 + \lambda_2 x_2) u. \end{aligned} \quad (10)$$

令 $\lambda_1 = \lambda_2 + \lambda_2 C_3 - 1, \lambda_2 C_3 - 1 > 0$,则

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -x_1^2 - \lambda_2 (\lambda_2 C_3 - 1) x_2^2 + (x_1 + \\ & \lambda_2 x_2) (x_1 - \lambda_2 C_2 u - \lambda_2 (C_1 + C_4)). \end{aligned} \quad (11)$$

定义系统的广义输入输出为

$$\begin{aligned} v &= (x_1 - \lambda_2 C_2 u - \lambda_2 (C_1 + C_4)), \\ y &= (x_1 + \lambda_2 x_2), \end{aligned} \quad (12)$$

则系统满足

$$\dot{V} \leq vy. \quad (13)$$

系统是无源的.根据无源性与稳定性之间的关系统定理,设计反馈控制律 $v = -y$,则可以保证系统是渐近稳定的.则获得非线性调制律为

$$u = \frac{2}{\lambda_2 C_2} x_1 + \frac{1}{C_2} x_2 - \frac{C_1 + C_4}{C_2}. \quad (14)$$

x_1 为 x_2 的积分信号,所以调制律中包含有两机间相对转子角速度的比例信号和积分信号和其他常量,易于实现.

4 仿真结果(Simulation results)

采用MATLAB/Simulink进行仿真. 直流系统额定电压为500 kV, 额定功率为1000 MW. 模块采用两

机的角速度和直流系统实测电压为输入, 输出电流调制信号, 传送给极控层, 如图2所示. 文中对两种情况进行了验证.

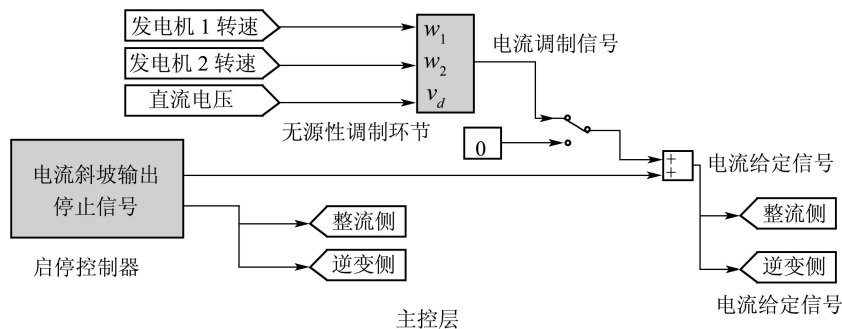


图2 控制器框图

Fig. 2 The blockgram of control system

情况1 直流系统的启动包括直流电压充电和直流电流的建立. 没有施加直流调制和施加非线性调制后其功角曲线如图3,4所示, 无调制下, 直流系统约6s后达到稳定. 施加非线性调制策略后, 其响应速度只需约1s, 且无振荡. 加入非线性调制后, 系统给定电流将随着两端系统角速度的变化而变化.

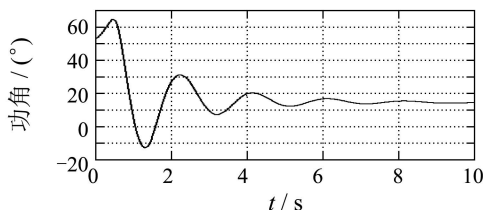


图3 直流系统启动时功角曲线(无调制)

Fig. 3 Power angle when HVDC starts (without modulation)

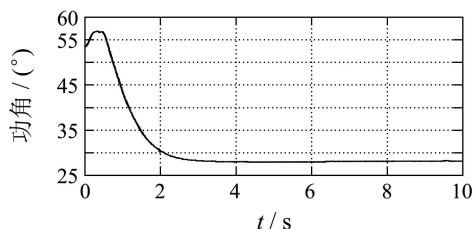


图4 直流系统启动时功角曲线(有调制)

Fig. 4 Power angle when HVDC starts (with modulation)

情况2 整流侧附近交流母线5s时发生5个周波三相短路故障. 无调制和有调制情况下的功角响应曲线分别如图5,6所示. 无调制时, 两机之间相对转角发生振荡, 5s后振荡仍未消失. 施加非线性调制律后, 系统在2s后, 振荡消失, 并重新回到原有的运行状态. 充分证明了该非线性调制策略能够提高系统的动态响应性能和保证系统的稳定性.

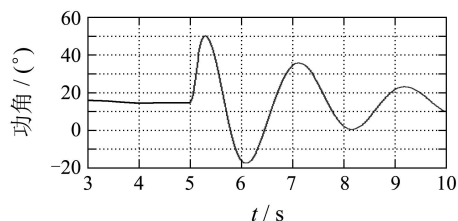


图5 三相故障后的功角曲线(无调制)

Fig. 5 Power angle in three phase fault (without modulation)

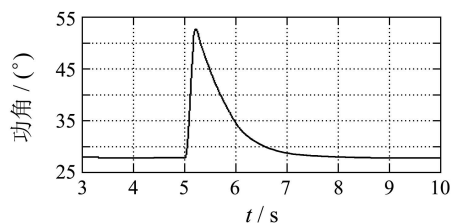


图6 三相故障后的功角曲线(有调制)

Fig. 6 Power angle in three phase fault (with modulation)

5 结论(Conclusion)

作为一个典型的复杂非线性系统, 传统控制方法很难满足交直流混合输电系统动态性能的要求. 本文采用无源性理论, 将其应用于两机交直流并联输电系统中. 通过对系统输入输出的重构, 验证系统满足无源性的要求, 通过无源性与稳定性之间的关系, 求出反馈控制律, 控制律简单且易于实现. 本文提出的非线性调制律在两种情况下都能提高系统的响应速度, 并能有效抑制两机之间的功角摇摆, 证明了本控制律的可行性和适应性.

参考文献(References):

- [1] 毛晓明, 吴小辰. 南方交直流并联电网运行问题分析[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 6-9.
(MAO Xiaoming, WU Xiaochen. Analysis on operational problems in South China AC-DC hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 6-9.)

$\text{diag}\{A_{r1}, A_{r2}\}$, $A_{r1} = A_{r2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6 & -5 \end{bmatrix}$, $r(t) = [0, 4 \sin t, 0, 4 \cos t]^T$. 采用定理1的方法, 仿真结果如图1所示. 图中(a)(b)(c)和(d)依次是状态 x_1, x_2, x_3 和 x_4 的响应曲线.

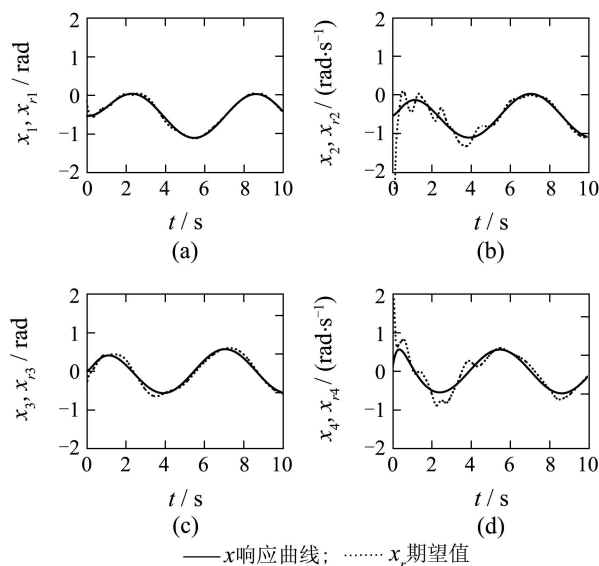


图1 状态 x_1, x_2, x_3, x_4 的响应曲线(虚线)及期望值 $x_{r1}, x_{r2}, x_{r3}, x_{r4}$ (实线)

Fig. 1 The responses of states x_1, x_2, x_3 and x_4 (dotted lines), and the anticipant value x_{r1}, x_{r2}, x_{r3} and x_{r4} (solid lines)

5 结论(Conclusion)

本文综合了两种模糊逻辑方式, 提出的控制方案能快速跟踪期望信号.

参考文献(References):

- [1] CAO Y Y, PARK P M. Analysis and synthesis of nonlinear time-delay systems via fuzzy control approach[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2000, 8(2): 200 – 211.
- [2] LIN C, WANG Q G, LEE T H. Output tracking control for nonlinear systems via T-S fuzzy model approach[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernet*, 2006, 36(2): 450 – 457.
- [3] KORBA P, BABUSKA R, VERBRUGGEN H B, et al. Fuzzy gain scheduling: controller and observer design based on lyapunov method and convex optimization[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2003, 11(3): 285 – 298.
- [4] TONG S C, WANG T, LI H X. Fuzzy robust tracking control for uncertain nonlinear systems[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2002, 30(2): 73 – 90.
- [5] KIM Y T, BIEN Z Z. Robust adaptive fuzzy control in the presence of external disturbance and approximation error[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2004, 148(33): 377 – 393.
- [6] YU W S. Tracking-based adaptive fuzzy-neural control for MIMO uncertain robotic systems with time delays[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2004, 146(3): 375 – 401.

作者简介:

杜贞斌 (1978—), 男, 博士, 讲师, 目前研究方向非线性控制,

E-mail: zhenbindu@yahoo.com.cn;

胡寿松 (1937—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为复杂

非线性系统的智能自修复控制.

(上接第779页)

- [2] SOOD V K. *HVDC and FACTS Controllers: Application of Static Converters in Power Systems*[M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [3] KUNDUR P. *Power System Stability and Control*[M]. New York: McGraw-Hill Companies, 1994.
- [4] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993. (LU Qiang, SUN Yuanzhang. *Nonlinear Control in Power System*[M]. Beijing: Science Press, 1993.)
- [5] TO K W V, DAVID A K. Adaptive controller for an HVDC power system[C]//*Proceedings of IEEE Region 10 Conference on Computer, Communication, Control and Power Engineering*. Hongkong: IEEE Press, 1993, 2: 262 – 264.
- [6] ROUTRAY A, DASH P K, PANDA S K. A fuzzy self-tuning PI controller for HVDC links[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1996, 11(5): 669 – 679.
- [7] 蔡超豪. HVDC 的非线性 H_∞ 控制[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 38 – 40. (CAI Chao hao. NonLinear H_∞ control of HVDC[J]. *Power System Technology*, 2004, 28(5): 38 – 40.)
- [8] XU G U, WANG J, CHEN C. Feedback stabilization for AC-DC power system with nonlinear loads[J]. *Electric Power Systems Research*, 2005, 74: 247 – 255.
- [9] 钟庆, 吴捷, 杨金明. 无源性控制在有源滤波器中的应用[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(5): 713 – 718. (ZHONG Qing, WU Jie, YANG Jinming. Application of passivity-based control in active power filters[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(5): 713 – 718.)
- [10] SEPULCHRE R, JANKOVIC M, KOKOTOVIC P V. *Constructive Nonlinear Control*[M]. London: Springer-Verlag, 1997.

作者简介:

钟庆 (1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为电力系统及其自动化、电力电子技术在电力系统中的应用及其控制技术,

E-mail: epqzhong@scut.edu.cn;

张尧 (1948—), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统运行与稳定、电力市场、电网规划, E-mail: epyzhang@scut.edu.cn;

吴捷 (1937—), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要研究方向为自适应组织控制、电力系统控制、新能源, E-mail: epjiuwu@scut.edu.cn;

杨金明 (1962—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为自适应组织控制、新能源, E-mail: jmyang@scut.edu.cn;

武志刚 (1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与稳定、电力系统控制, E-mail: epzgwu@scut.edu.cn.