

降低 HVDC 逆变器无功损耗的非线性附加控制

刘小江, 刘天琪, 刘群英

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 在逆变侧交流电压下降期间, 逆变器对无功消耗的增多会导致电压进一步恶化, 甚至崩溃。因此, 在传统 P 控制的基础上, 基于非线性控制中的状态反馈精确线性化方法, 设计了用于降低故障期间逆变器无功损耗的非线性附加控制器。仿真结果表明该非线性附加控制器能合理地调节换流器在电压下降期间对无功功率的吸收, 以维持逆变侧电压水平, 从而提高系统的暂态稳定性。

关键词: 高压直流; 非线性附加控制; 暂态稳定; 精确线性化

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)07-0006-04

0 引言

换流器在工作中要消耗相当大的感性无功功率。在额定条件下运行时, 整流器消耗的无功功率约为直流功率的 30% ~ 50%, 逆变器约为 40% ~ 60%^[1]。当交直流系统处于重载期间, 如果在逆变侧发生大扰动, 会引起逆变侧交流电压下降, 且电压恢复缓慢。由于交流电压下降和 α 角可能增加, 逆变器功率因数降低, 结果导致逆变器需要更多的无功, 从而进一步引起交流电压下降, 甚至可能引发电压崩溃^[2]。因此合理调节逆变器对无功功率的吸收对于维持整个系统的稳定性有着至关重要的作用。值得注意的是换流器在恰当的控制方式下不仅能大范围地调节有功功率, 而且能大幅度、快速地调节其消耗的感性无功功率^[3]。因此, 可在恰当的直流基本控制方式下, 利用直流输电线附加控制能够进行无功功率调节和动态电压支持的特性^[3], 合理调节逆变器对无功功率的吸收, 提高交直流系统暂态稳定性。

现有的线性化的控制策略, 如 PD 控制, PSS (电力系统稳定器) 和 LOEC (线性最优励磁控制) 的设计是基于一点或多个运行点的线性化模型, 在某种不可预测的大扰动情况下, 由于实际电力系统的强非线性特性而得不到满意的效果^[4]。相比之下, 非线性控制在提高电力系统大扰动稳定性方面有更好的效果。因此本文在整流侧定直流电流, 逆变侧定交流电压传统 P 控制器的基础上, 设计了基于状态反馈精确线性化理论的非线性附加控制器, 可有

效地改善逆变侧的无功消耗, 提高其电压水平及稳定性, 从而提高整个系统的暂态稳定性。

1 电压调节效应

图 1 为逆变站的接线示意图, 所用符号以及有功、无功 (感性) 的参考方向如图 1 所示。

由图 1 可知逆变器消耗的无功功率为: $Q_n = P_{di} \cdot \tan \phi_i$, P_{di} 为直流输电线路输送的有功功率, ϕ_i 为逆变站功率因数角。

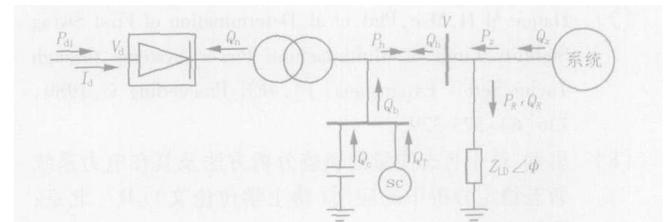


图 1 逆变站接线示意图

Fig 1 Schematic diagram of inverter station's connection

文献 [1] 提出的电压稳定判据为:

$$\frac{dQ_h}{dV} > \frac{dQ_r}{dV} \quad (1)$$

上式左边比右边大得越多, 电压的稳定性就越好。相反当左边比右边小时, 便不能稳定运行。电压调节效应就是用 dQ/dV 的相对值来表示, 即:

$$\frac{dQ}{dV} = \frac{dQ/V}{dV/V} \quad (2)$$

其中: Q 和 V 是对应于运行点的无功功率和电压。

换流站的无功功率由 Q_n 、 Q_r 和 Q_c 组成, 所以 $Q_h - V$ 特性可由以上三个相应的特性相加得到。将 $Q_h = Q_n - Q_c - Q_r$ (该式略去了换流变压器的无功功率损耗) 对 V 求导, 可得到运行点电压调节效应的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50377017)

计算式:

$$\frac{dQ_{h*}}{dV_*} = \frac{dQ_{n*}}{dV_*} \cdot \frac{Q_n}{Q_h} - \frac{dQ_{T*}}{dV_*} \cdot \frac{Q_T}{Q_h} - \frac{dQ_{c*}}{dV_*} \cdot \frac{Q_c}{Q_h} \quad (3)$$

上式表明,换流器的电压调节效应与各组成部分的调节效应及无功容量的分配有关。由式(1)可知,较大的 dQ_{h*}/dV_* 值对电压稳定性有利,所以希望换流器具有较大的调节效应,调相机和静止无功功率补偿设备具有较小的调节效应,最好是负值,并且调节效应小的补偿设备,应多分配无功容量。

2 基本控制方式的选择

文献[3]中指出:对于远距离高压直流输电,换流器可作为稳态和动态期间的静止无功补偿器,通过逆变器的超前触发角来调节逆变器对交流系统无功的吸收。同时该文指出换流器吸收的无功功率取决于直流控制方式。因而换流器控制方式的选取,特别是逆变器控制方式的选取尤为为重要。以下为在正常运行情况以及小扰动情况下,逆变器在三种不同控制方式下,系统运行工况的比较。

如果逆变器采用定熄弧角控制,当交流电压下降时,逆变器的功率因数下降,消耗的无功功率增大,致使交流电压进一步下降。其电压调节效应往往很小,甚至为负,这对保持电压稳定不利。如果逆变器采用定直流电压控制方式,虽然电压调节特性较好,但在额定条件下运行时,系统运行点要在定熄弧角特性之下,如图2的A点所示。相比定熄弧角控制方式,逆变器的额定功率因数和直流电压要低一些,亦即在额定情况下其所消耗的无功功率较多,换流器的利用率较低。如果在逆变侧采用定交流电压调节方式,逆变器的电压调节效应可以做的很大,能够有效地提高弱系统的电压稳定性,并且能保持线路故障时换流站无功功率的大体平衡。

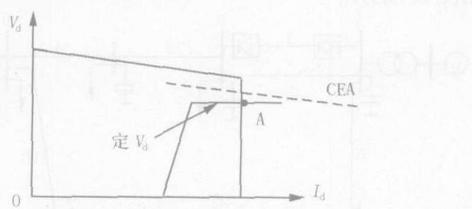


图 2 换流器稳态伏安特性

Fig 2 Converter steady-state V-I characteristics

所以本文选取整流器定直流电流,逆变器定交流电压的控制方式作为基本控制方式。

3 基于状态反馈精确线性化方法的非线性附加控制器的基本原理

由于直流输电系统的基本控制方式仅适用于小扰动和正常运行情况^[5],所以有必要利用附加控制来提高交直流系统在大扰动情况下的暂态稳定性。同时,在系统运行工况经常变化的情况下,现有的线性化控制策略不能进行合理的调节。而利用非线性控制理论,通过恰当的坐标变换和非线性反馈,可以使非线性系统在整个状态空间或状态空间的一个足够大的域中精确线性化^[6,7]。这样就克服了基于线性化方法所设计的控制器的弊端。应用这一理论设计的非线性附加控制器仅采用本地状态量或输出量作为反馈量,其中的一些反馈量可以直接或间接地反映整个系统的运行状态,从而只需局部信息就能构成调节性能良好的局部控制器,实现起来也较为容易。如图3所示,在整流侧传统定直流电流控制器(如图3虚线框图所示)的基础上增加了非线性附加控制器。它们共同的控制目标就是使实际直流电流 $I_d(t)$ 与设定值 I_{d0} 的偏差为最小值。其中附加控制量 u 充分反映了 I_d 、 V_a 和 V_{dr} 等当地状态量和输出量的变化,从而反映了整个系统运行状态的变化。同样,逆变侧附加非线性控制器的控制目标是使逆变侧实际交流电压 V_{ar} 与设定值 V_{ar0} 的偏差最小。从而,两侧控制器协调一致,在小干扰和大干扰情况下充分发挥了直流换流器的快速调节对改善交直流输电系统运行性能,提高系统稳定性的作用。

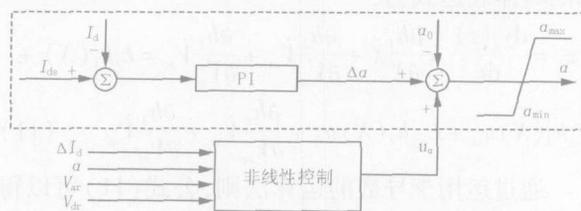


图 3 整流侧定直流电流非线性附加控制器

Fig 3 Additional nonlinear controller for constant DC at the rectifier side

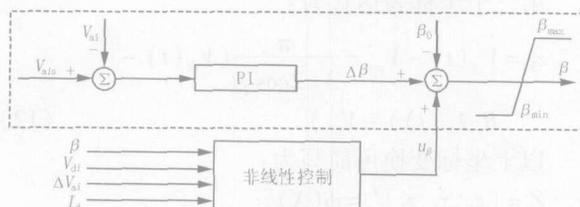


图 4 逆变侧定交流电压非线性附加控制器

Fig 4 Additional nonlinear controller for constant AC voltage at the inverter side

4 非线性附加控制器的设计

首先选取直流控制系统数学模型:

$$\dot{I} = \frac{1}{L_{d\Sigma}} (-R_{d\Sigma} I_d(t) + \frac{3\sqrt{2}}{2} V_{ar}(t) \cos \alpha - \frac{3\sqrt{2}}{2} V_{ai}(t) \cos \alpha) \quad (4)$$

$$\dot{V}_{ar} = \frac{1}{T} (-V_{ar} + u_{ar}(t)) \quad (5)$$

$$\dot{V}_{ai} = \frac{1}{T} (-V_{ai} + u_{ai}(t)) \quad (6)$$

重写上面的数学模型如下:

$$\dot{X} = f(X) + g(X)u + h(X)u \quad (7)$$

其中: $X = [I_d(t), V_{ar}, V_{ai}]^T$; $f(X) = [0, \frac{1}{T}, 0]^T$;

$g(X) = [0, 0, \frac{1}{T}]^T$; u_{ar}, u_{ai} 分别为整流侧定直流电流和逆变侧定交流电压的控制变量。

为了在任何时刻都保持直流电流和逆变侧交流电压的恒定,建立以下两个性能指标:

$$y_I(t) = h_I = I_d(t) - I_{ds} \quad (8)$$

$$y_V(t) = h_V = V_{ai}(t) - V_{ais} = \frac{1}{3\sqrt{2}\cos\alpha} (V_{di}(t) - R_{ci}I_{di}(t)) - V_{ais} \quad (9)$$

为了对系统进行精确线性化,选择一组坐标变换如下

$$\text{第一个坐标为: } z_1 = y_I(t) = I_d(t) - I_{ds} \quad (10)$$

参考文献 [6], 利用李导数可以得到第二个坐标的具体表达式为:

$$z_2 = \frac{dy_I(t)}{dt} = \frac{\partial h_I}{\partial X} \dot{X} + \frac{\partial h_I}{\partial V_{ar}} \dot{V}_{ar} + \frac{\partial h_I}{\partial V_{ai}} \dot{V}_{ai} = L_f h_I(X) + L_g h_I(X)u + L_g h_I(X)u + \frac{\partial h_I}{\partial V_{ar}} \dot{V}_{ar} + \frac{\partial h_I}{\partial V_{ai}} \dot{V}_{ai} \quad (11)$$

通过运用李导数的运算法则,公式(11)可以得到如下的表达式:

$$z_2 = \frac{dy_I}{dt} = L_f h_I(X) = \left[\frac{\partial h_I}{\partial I_d} \frac{\partial h_I}{\partial V_{ar}} \frac{\partial h_I}{\partial V_{ai}} \right] f(X) = \dot{I}_d$$

第三个坐标表达式为:

$$z_3 = V_{ai}(t) - V_{ais} = \frac{1}{3\sqrt{2}\cos\alpha} (V_{di}(t) - R_{ci}I_{di}(t)) - V_{ais} \quad (12)$$

以上坐标变换可简写为:

$$Z = [z_1, z_2, z_3]^T = \phi(X)$$

由于雅可比矩阵 $J_\phi = \frac{\partial \phi}{\partial X}$ 的行列式的值在直流

系统的所有运行范围内均不为零,所以前面选择

$Z = \phi(X)$ 为系统(7)~(9)的一组合格的坐标变换。因此,通过利用李导数,将系统(7)~(9)式变换成以下形式:

$$\dot{z}_1 = z_2 = \dot{I}_d \quad (13)$$

$$\dot{z}_2 = \frac{d}{dt} L_f h_I(X) = L_f^2 h_I(X) + L_{g_a} L_f h_I(X)u + L_g L_f h_I(X)u + \frac{\partial L_f h_I}{\partial V_{ar}} \dot{V}_{ar} + \frac{\partial L_f h_I}{\partial V_{ai}} \dot{V}_{ai} \quad (14)$$

$$\dot{z}_3 = \frac{d}{dt} h_V = L_f h_V(X) + L_{g_a} h_V(X)u + L_g h_V(X)u + \frac{\partial h_V}{\partial V_{di}} \dot{V}_{di} + \frac{\partial h_V}{\partial V_{ar}} \dot{V}_{ar} + \frac{\partial h_V}{\partial V_{ai}} \dot{V}_{ai} \quad (15)$$

通过运用李导数的计算法则,最终可得到该非线性系统的整流侧定直流电流和逆变侧定交流电压的附加控制规律:

$$u_{ar} = \frac{T L_{d\Sigma}}{3\sqrt{2}V_{ar}(t) \sin\alpha} (I_d + (\sqrt{3} - \frac{R_{cr}}{L_{d\Sigma}}) I_d) + (-V_{ar}) + \frac{T \cos\alpha}{V_{ar}(t) \sin\alpha} \dot{V}_{ar} - \frac{T \dot{V}_{dr}}{3\sqrt{2}V_{ar}(t) \sin\alpha} \quad (16)$$

$$u_{ai} = -\frac{3\sqrt{2}T \cos^2\alpha}{\sin\alpha (V_{di}(t) - R_{ci}I_{di})} V_{ai} + (-V_{ai}) + \frac{T \cos\alpha}{\sin\alpha (V_{di}(t) - R_{ci}I_{di})} (R_{ci} \dot{I}_d - \dot{V}_{di}) \quad (17)$$

5 算例仿真

本文采用交直流系统仿真软件 NETOMAC 运用所设计的控制器对图 5 所示的三机交直流系统进行动态仿真。直流系统的初始运行条件为:整流器触发角 $\alpha = 15^\circ$; 逆变器关断越前角 $\beta = 18^\circ$; 数字仿真考察了在线路 5 上靠近母线 E 处故障时,系统在三种控制方式下的运行状况,故障为三相短路,故障开始时间为 0.25 s, 100 ms 后切除故障。仿真结果如图 6 所示。

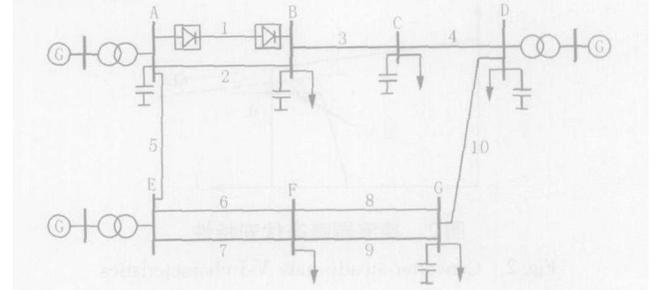
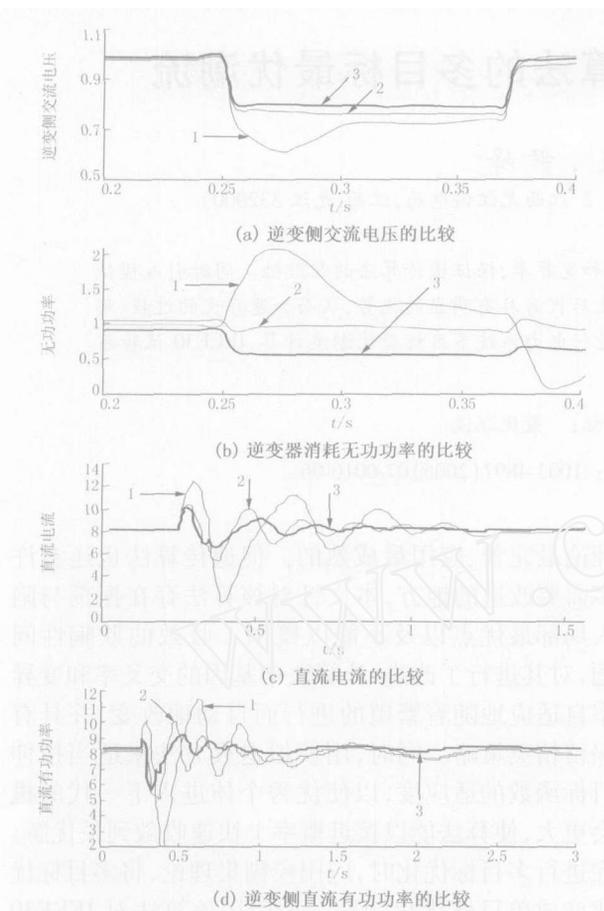


图 5 仿真系统模型

Fig 5 Model of simulation system



1 - 整流器定直流电流,逆变器定熄弧角 P控制; 2 - 整流器定直流电流,逆变器定交流电压 P控制; 3 - 附加有非线性控制器的整流侧定直流电流,逆变侧定交流电压的控制方式

图 6 线路 5 三相短路故障时三种控制器性能的比较

Fig 6 Performance comparison of three controllers for a three phase AC fault at line 5

从图 6(a)、(b)看出,在故障期间,也就是电压急剧下降期间,在整流器定直流电流,逆变器定熄弧角 P 控制方式下,逆变器无功消耗增多,导致电压进一步下降。在严重情况之下,会导致电压崩溃。与前一种控制方式相比较,在整流侧定直流电流,逆变侧定交流电压传统 P 控制方式下,逆变器对无功消耗要小的多,电压水平也相对较高。相比以上两种控制方式,在附加有非线性控制器的整流器定直流电流,逆变器定交流电压的控制方式下,逆变器的无功消耗更是明显减少,逆变侧交流电压水平和暂态稳定性得到提高。

从图 6(c)看出,在附加有非线性控制器的整流侧定直流电流,逆变侧定交流电压的控制方式下,由于逆变侧交流电压水平和暂态稳定性得到提高,同

时由于整流侧采用了定直流电流非线性附加控制器,因而直流电流的摇摆幅度和摇摆次数明显减少。

从图 6(d)看出,在附加有非线性控制器的整流侧定直流电流,逆变侧定交流电压的控制方式下,由于逆变器无功功率合理消耗带来的交流电压水平和暂态稳定性的提高,以及直流输电线的直流电流摇摆幅度和次数减少,系统暂态稳定性得以提高,从而逆变侧直流功率的摇摆幅度和次数减少。

6 结论

恰当的基本控制方式对改善系统运行工况是有利的。但传统的 P 控制器仅适用于正常运行和小干扰情况而不适应于紧急控制。而采用附加有非线性控制器的整流器定直流电流,逆变侧定交流电压的控制方式有助于减少逆变器在大扰动故障期间的无功消耗,提高逆变侧交流电压水平及其暂态稳定性,并且直流电流和直流输电线传输的有功功率的暂态稳定性得到提高,从而改善了系统的动态特性。

参考文献:

- [1] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电 [M]. 北京: 电力工业出版社, 1982
The Scientific and Research Team of HVDC in Zhejiang University. The Transmission of HVDC [M]. Beijing: Electric Power Industry Press, 1982
- [2] Carson W. Taylor Power System Voltage Stability [M]. McGraw-Hill Companies, 1994
- [3] 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
LI Xing-yuan. The Operating and Control of HVDC System [M]. Beijing: Science Press, 1994
- [4] LU Qiang, MEI Sheng-wei. Nonlinear Decentralized Disturbance Attenuation Excitation Control via New Recursive Design for Multimachine Power Systems [M]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4): 729-736
- [5] Sood V K, Kandil N, Patel R V, et al. Comparative Evaluation of Neural-network-based and PI Controllers for HVDC Transmission [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1994, 9(3): 288-296
- [6] 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 Yuan-zhang. Nonlinear Control of Power System [M]. Beijing: Science Press, 1993

(下转第 45 页 continued on page 45)

- of Electric Power Systems, 2003, 27 (17): 15-18
- [5] Steele J A, McDonald J R D, Arcy C. Knowledge Discovery in Database: Applications in Electrical Power Engineering Domain [J]. IEE Colloquium (Digest), 1997, (340).
- [6] 王培红,陈强,董益华. 数据挖掘及其在电厂 SIS中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (8): 76-79.
WANG Pei-hong, CHEN Qiang, DONG Yi-hua Data Mining and Its Application of Performance Analysis in Thermal Power Units [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (8): 76-79.
- [7] 马瑞. 电力市场中兼顾环境保护和经济效益的双目标模糊优化短期交易计划新模型 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (4): 104-108

MA Rui A Novel Bi-objective Fuzzy Optimal Model of Short-term Trade Planning Considering Environment Protection and Economic Profit in a Deregulated Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (4): 104-108

收稿日期: 2004-07-14; 修回日期: 2004-09-06

作者简介:

黎静华 (1982 -),女,硕士研究生,从事人工智能在电力系统中的应用、数据仓库与挖掘在电力系统中的应用的研究; E-mail: lijinghuahua0@sina.com

栗然 (1965 -),女,副教授,从事人工智能在电力系统中的应用、数据仓库与挖掘、电网调度运行管理等的研究。

Evaluation of the ability of units bidding based on rough set theory

LI Jing-hua, LI Ran

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: A new data mining method for evaluation of the ability of units bidding is proposed. The paper presents a novel framework that takes various factors into consideration, including market demand, bidding price and the capacity of bidding units. The basic theory of rough set is introduced and how to investigate its rules is explained in detail. An example which considers the various factors is illustrated. The example indicates the procedure of calculation, finds association among many factors and obtains the units' bidding ability. The rules are very useful in supporting the generating bidding unit to make decisions and helping the electric agency (Power exchange, PX and Independent System Operator, ISO) to design an optimal trade plans.

Key words: data mining; rough set; power market; generation bidding

(上接第 9 页 continued from page 9)

- [7] WANG You-yi, XIE Liu-hua, Hill D J, et al. Robust Nonlinear Controller Design for Transient Stability Enhancement of Power Systems [A]. Proceedings of the 31st Conference on Decision and Control Tucson (Arizona): 1992

作者简介:

刘小江 (1973 -),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定和控制; E-mail: quality3451@163.com

刘天琪 (1962 -),女,教授,博士,研究方向为电力系统分析计算与稳定控制,调度自动化;

刘群英 (1978 -),女,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定和控制。

收稿日期: 2004-07-07; 修回日期: 2004-10-09

An additional nonlinear control for lowering reactive power consumed by HVDC inverter

LU Xiao-jiang, LU Tian-qi, LU Qun-ying

(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: During AC voltage dips at the inverter side, AC voltage will deteriorate, even collapse if inverter consumes much reactive power. Therefore, this paper designs an additional nonlinear controllers based on exact linearization method by state feedback of nonlinear control theory and the conventional PI control. The additional nonlinear controller at the inverter side is to prevent inverter consuming too much reactive power during fault. The simulation results show the additional controller at the inverter side can regulate reactive power absorbed by converter reasonably during AC voltage dips, thus, the voltage performance at the inverter side and the transient stability of AC/DC systems can be improved.

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

Key words: HVDC; additional nonlinear control; transient stability; exact linearization