

# 新型直流输电系统的非线性附加控制器设计

黄北军, 邹超, 王奔

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:**基于电压源换流器(voltage source converter VSC)和脉宽调制(pulse width modulation PWM)技术的新型高压直流输电(VSC-HVDC)系统,不仅具有有功功率快速调节能力,而且具有无功功率快速调节能力。该文以非线性理论和最优控制理论为基础,通过建立单机经交直流并联于无穷大电力系统的机电振荡非线性数学模型,利用精确线性化理论将非线性系统化为线性系统,在线性系统的基础上设计最优控制器,通过坐标变换,得出非线性附加控制规律,仿真结果表明VSC-HVDC系统在装设了该附加控制器后,可显著增加系统振荡阻尼,快速恢复系统稳定。

**关键词:**电压源换流器;新型高压直流输电;精确线性化;最优控制;附加阻尼控制器

**Abstract:** Based on voltage source converter (VSC) and pulse width modulation (PWM) technology, the VSC-based HVDC transmission system not only possess the capability of controlling active power fast, but also possess the capability of controlling reactive power quickly. Based on nonlinear theory and optimum control theory, the electromechanical oscillation nonlinear mathematical model of infinity power system is built with single machine by AC/DC connection, the nonlinear system is transferred to linear system based on precision linearized theory, the optimum controller for this linear system is designed, the nonlinear additional control law is obtained through coordinate transformation. Simulation results show that the system damping for frequency oscillation can be obviously increased and the system stability can be rapidly recovered after the additional damping controller is equipped.

**Key words:** voltage source converter; VSC-HVDC, precision linearized theory; optimum control; additional damping controller.

中图分类号:TM762 文献标识码:A 文章编号:1003-6954(2008)02-0014-04

新型直流输电是采用电压源换流器的直流输电系统,与传统的直流输电相比,VSC-HVDC 具有更多的优势<sup>[1]</sup>;VSC 可以对有功功率和无功功率进行独立控制;可以在现场快速安装与调试换流站;输电容量可以提高约 50%。另外,VSC-HVDC 具有增加系统振荡阻尼、提高其稳定性的能力<sup>[2,3]</sup>;向无源网络供电、不会出现换相失败等众多优点<sup>[4,5]</sup>。鉴于上述的优点,随着 IGBT 容量的增大及成本的下降,VSC-HVDC 在电力系统中的应用将越来越广泛。文献[6]和[7]分别采用普罗尼辨识理论和 Bang-Bang 控制原理设计了 VSC-HVDC 系统的附加控制器,可显著地提高系统的振荡阻尼,在一定程度下满足系统稳定性要求,但是它们都是将原本非线性系统通过近似线性化的方法,设计线性的附加控制器,当实际运行状态远离线性化所取的状态点时,控制器将达不到符合要求的稳定性和动态品质。文献[8]设计了 VSC-HVDC 的非线性附加控制器,但其控制参数不易确定。基于此背景,下面将采用非线性控制理论<sup>[9]</sup>以及最优控制理论<sup>[10]</sup>设计 VSC-HVDC 的非线性附加阻尼控制器。

## 1 VSC-HVDC 控制策略

图 1 是 VSC-HVDC 系统示意图<sup>[7]</sup>,VSC-HVDC 两侧换流站用框图表示,整流和逆变两侧换相交流电压分别用相量  $V_R$ 、 $V_I$  表示,直流线路用电感  $L_d$ 、电阻  $R_d$  表示, $C_1$ 、 $C_2$  分别表示两侧直流平波电容,电容电压分别为  $U_{C1}$ 、 $U_{C2}$ ,直流电流  $i_d$ ,两侧交流电流  $I_1$ 、 $I_2$ ,参考方向如图 1 所示, $x_1$ 、 $x_2$  分别为两侧等效换相电抗。整流和逆变侧交流母线电压用相量  $V_1$ 、 $V_2$  表示。

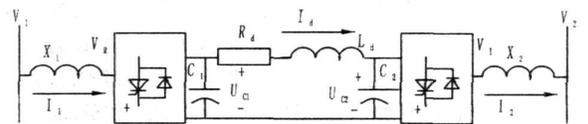


图 1 VSC-HVDC 系统示意图

通过图 1 可写出整流侧和逆变侧交流母线的微分方程,并进行 Park 变换转化为 dq 坐标系下的微分

方程:

$$\frac{dI_1^d}{dt} = \omega I_1^q - \frac{r_1}{L_1} I_1^d + \frac{V_1^d - V_R^d}{L_1} \quad (1)$$

$$\frac{dI_1^q}{dt} = \omega I_1^d - \frac{r_1}{L_1} I_1^q + \frac{V_1^q - V_R^q}{L_1}$$

$$\frac{dI_2^d}{dt} = \omega I_2^q - \frac{r_2}{L_2} I_2^d + \frac{V_2^d - V_I^d}{L_2} \quad (2)$$

$$\frac{dI_2^q}{dt} = \omega I_2^d - \frac{r_2}{L_2} I_2^q + \frac{V_2^q - V_I^q}{L_2}$$

其中  $L_1, L_2$  分别为换相电抗  $x_1, x_2$  对应的电感值。

若左端系统是对称三相,  $V_1^q = 0$ , 注入系统有功和无功为:

$$P_1 = V_1^d I_1^d, Q_1 = V_1^q I_1^q$$

从式(1)、(2)可以看出, 交直轴上电流分量存在耦合关系, 如式(1)中电流直轴分量  $I_1^d$  不仅和直轴上电压分量有关系, 同时它与电流交轴分量  $I_1^q$  也有关系, 所以需要设计一种解耦控制策略将电流交直轴分量分开进行控制, 同时也可以看出, 系统模型中存在内部电流环, 这里内部电流环是指内部电流控制器, 根据式(1)可以定义PI 电流控制器如下:

$$V_R^{d*} = V_1^d + x_1 I_1^q - \Delta U_1^d$$

$$V_R^{q*} = V_1^q + x_1 I_1^d - \Delta U_1^q$$

$$\Delta U_1^d = k_d [T_d (I_{REF}^d - I_1^d) + \int (I_{REF}^d - I_1^d) dt]$$

$$\Delta U_1^q = k_q [T_q (I_{REF}^q - I_1^q) + \int (I_{REF}^q - I_1^q) dt]$$

其中:  $I_{REF}^d$  为整流器侧交轴电流参考命令,  $I_{REF}^q$  为整流器侧直轴电流参考命令,  $\Delta U_1^d, \Delta U_1^q$  为直交轴电流调整的电压命令,  $V_R^{d*}, V_R^{q*}$  为SPWM 命令参考。

由于直流电压与整流、逆变两侧功率平衡有关, 当两侧功率在暂态出现瞬间不平衡时, 会引起电压的波动, 所以直流电压的控制是一个重要因素, 将直流电压控制作为外部控制环之一, 考虑到交流电压在系统扰动时会波动, 选择对交流电压幅值进行调节, 控制框图如图2(a)所示。

逆变侧外控制环以注入系统的潮流为控制目标, 同样采用PI 调节方式, 控制框图如图2(b)所示。

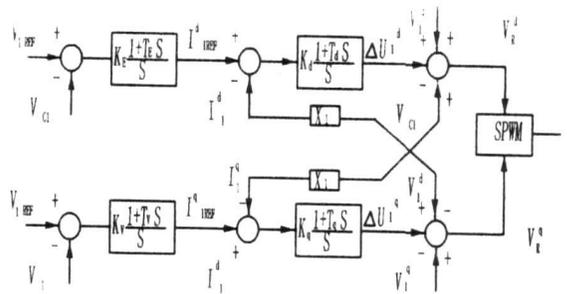
用于PWM 控制的调制度和调制相角分别为:

$$m_1 = \sqrt{V_I^{d*2} + V_I^{q*2}} / (k_1 \mu_{c1})$$

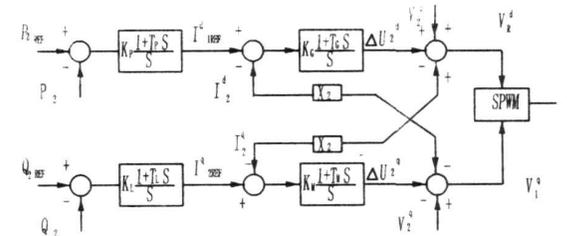
$$\theta_1 = \arctg(V_I^{q*} / V_I^{d*})$$

$$m_2 = \sqrt{V_I^{d*2} + V_I^{q*2}} / (k_2 \mu_{c2})$$

$$\theta_2 = \arctg(V_I^{q*} / V_I^{d*})$$



(a) 整流侧控制框图



(b) 逆变侧控制框图

图2 VSC-HVDC 控制框图

## 2 非线性附加控制器设计的数学模型

系统结构如图3所示, 为单机经交直流并联于无穷大母线的电力系统。图中  $P_L$  代表地方负荷。

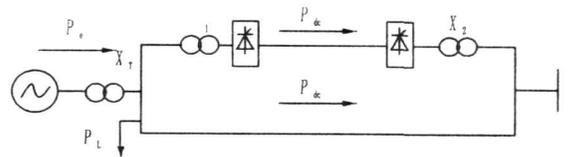


图3 交直流电力系统结构图

发电机采用经典二阶模型, 则可得发电机的转子运动方程式为:

$$\delta = \omega$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} (P_m - \frac{D}{\omega_0} \omega - P_e) \quad (3)$$

$$\text{其中, } P_e = P_{ac} + P_{dc} + P_{L1}$$

式中,  $\delta$  为发电机转子角,  $\omega$  为转子角速度,  $H$  为转动惯量,  $D$  为发电机阻尼系统,  $P_m$  为发电机机械功率,  $P_e$  为发电机电磁功率。  $P_{ac}$  为并联交流线路功率,  $P_{dc}$  为直流系统功率。

在研究交直流系统稳定控制中, 一般不考虑直流

线路的动态特性,而对直流功率的调节视为一阶惯性环节,即直流功率的状态方程写为<sup>[7]</sup>:

$$P_{dc} = \frac{1}{T_d}(-P_{dc} + P_{dcREF} + \mu_{dc}) \quad (4)$$

式中,  $P_{dcREF}$  为直流功率的给定值,  $T_d$  为直流系统的等效时间常数,  $\mu_{dc}$  为直流系统的控制。

以发电机的转子角的增量作为非线性控制器设计的输出方程,即:

$$y(t) = \delta(t) - \delta_0 \quad (5)$$

综合(3)、(4)、(5)式,可以得到交直流输电系统非线性控制系统的状态方程及输出方程如下:

$$\begin{aligned} \delta &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{\omega_0}{H} (P_m - \frac{D}{\omega_0} \omega - P_{ac} - P_{dc} - P_{L1}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$P_{dc} = \frac{1}{T_d}(-P_{dc} + P_{dcREF} + \mu_{dc})$$

输出方程为:

$$y(t) = h(x) = \delta(t) - \delta_0 \quad (7)$$

### 3 非线性附加控制器的设计

#### 3.1 精确线性化

这里采用状态反馈精确线性化的原理<sup>[7]</sup>,将(6)和(7)式的非线性系统数学模型精确线性化为一个完全可控的线性模型,首先将(6)和(7)式写成标准的仿射非线性系统形式:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x) \mu \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{其中, } x = [\delta \ \omega \ P_{dc}]^T \quad g(x) = [0 \ 0 \ \frac{1}{T_d}]^T$$

通过计算给定系统的各阶李导数,可知系统的关系度  $r = n = 3$ 。

因此,可求出以下坐标变化  $\phi$ :

$$\begin{aligned} z_1 &= h(x) = \delta \\ z_2 &= L_f h(x) = \omega \\ z_3 &= L_f^2 h(x) = \dot{\omega} \\ &= \frac{\omega_0}{H} (P_m - \frac{D}{\omega_0} \omega - P_{ac} - P_{dc} - P_{L1}) \end{aligned} \quad (9)$$

上面坐标变换的雅克比矩阵为:

$$J_\phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{\omega_0}{H} \frac{\partial P_{ac}}{\partial \delta} & -\frac{D}{H} & -\frac{\omega_0}{H} (1 + \frac{\partial P_{ac}}{\partial P_{dc}}) \end{pmatrix}$$

此处,交流线路的传输功率是发电机转子角  $\delta$

和直流传输功率  $P_{dc}$  的函数。

则有,  $\det (J_\phi) = -\frac{\omega_0}{H} (1 + \frac{\partial P_{ac}}{\partial P_{dc}})$  显然,如果  $\frac{\partial P_{ac}}{\partial P_{dc}} \neq -1$ ,由(9)式表示的关系可以作为(8)式的一组坐标变换,在邻域  $\Omega = \{ \delta, \omega, P_{dc} \mid \frac{\partial P_{ac}}{\partial P_{dc}} \neq -1 \}$  上可以将交直流非线性控制系统(8)式变化为一个完全可控的线性系统:

$$\dot{z}_1 = z_2; \quad \dot{z}_2 = z_3; \quad \dot{z}_3 = v$$

$$\text{输出方程为: } y = z_1$$

即可得:

$$Z = AZ + Bv \quad (10)$$

其中

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

#### 3.2 最优控制器

根据线性最优控制理论<sup>[10]</sup>,对线性系统(10)式采用二次型控制规律进行控制设计,选取性能指标  $J$ :

$$J = \int_0^\infty [z^T Q z + v^T R v] dt$$

其中,  $Q$ 、 $R$  为正定的权矩阵,  $R$  一般为单位矩阵,  $Q$  为对角矩阵。

最优控制规律为:

$$v = -Kz, \quad K = R^{-1} B^T P$$

$P$  为黎卡提(Ricatti)方程的解:

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

通过调整  $Q$  矩阵对角线的相应元素来调整对应状态量的阻尼,从而达到最佳的控制效果。选取适当权矩阵  $Q$ ,可求出线性系统(8)式的最优控制:

$$v = -3.16z_1 - 5.58z_2 - 3.34z_3 \quad (11)$$

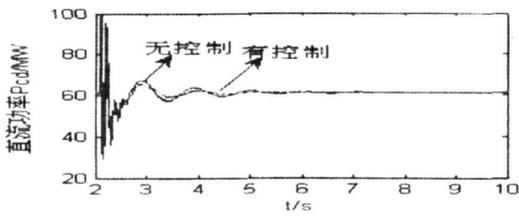
将(9)式中的  $z_3$  表达式求导后代入到(10)式,经整理并将(11)式代入其中后可得换流器的非线性附加最优控制规律为:

$$\begin{aligned} \mu_{dc} &= \frac{\omega_0}{T_d H} [3.16\delta + 5.58\omega + (3.34 - \frac{D}{H})\dot{\omega}] - \frac{1}{T_d} \\ &P_{ac}\dot{\omega} + (P_{dc} - P_{dcREF}) \end{aligned}$$

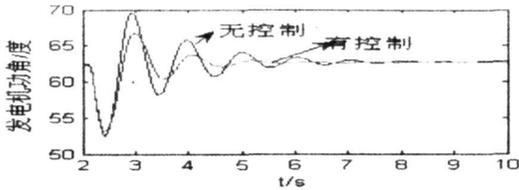
### 4 仿真验证

为了验证所设计的 VSC-HVDC 系统非线性附加最优控制器的有效性及快速稳定性,将所设计的控制器装设于整流侧常规控制 PI 调节处,利用 PSCAD/

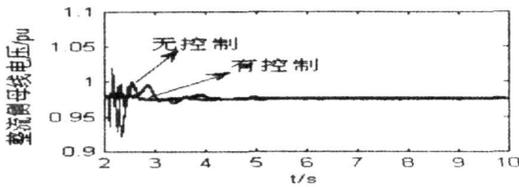
EMTDC 进行系统时域仿真。仿真的主要参数见文献 [7], 仿真结果如图 4 所示。



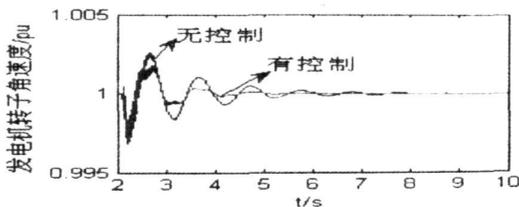
(a) 直流线路功率  $P_{dc}$



(b) 发电机功角  $\delta$



(c) 整流侧母线电压  $V_1$



(d) 发电机转子角速度  $\omega$

图 4 系统的响应曲线

图中的扰动为逆变侧交流母线在 2.2 s 时发生三相短路故障, 持续时间为 0.2 s。仿真结果表明: 所设计的 VSC-HVDC 系统的非线性最优控制器能显著的增加系统阻尼, 且系统恢复稳定的时间较短。

## 5 结论

在 VSC-HVDC 系统动态模型基础上, 采用基于变换的状态反馈解耦控制的双闭环控制方式作为

VSC-HVDC 的常规控制。通过建立单机经交直流并联于无穷大电力系统的数学模型, 其中, 发电机采用经典的二阶模型, 调节方式为一阶惯性的直流功率调节。利用非线性理论和最优控制理论设计 VSC-HVDC 系统的附加阻尼控制。采用 PSCAD/EMTDC 仿真软件对该单机无穷大系统进行大干扰非线性仿真实验, 验证了 VSC-HVDC 系统在装设了该附加阻尼控制器后, 系统振荡阻尼明显增加, 并迅速进入稳定。

## 参考文献

- [1] Vijay K. Sood(著), 徐政(译). 高压直流输电与柔性交流输电控制装置—静止换流器在电力系统中的应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [2] Johansson S G, Asplund G, Jansson E, et al. Power system stability benefits with VSC DC-transmission systems[C]. CI-GRE, Paris, 2004.
- [3] Huang Z, Ooi B T, Dessaint L A, et al. Exploiting voltage support of voltage-source HVDC[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(2): 252-256.
- [4] 王凤川. 电压源换流器式轻型高压直流输电[J]. 电网技术, 1999, 23(4): 74-76.
- [5] 文俊, 张一工, 韩民晓, 等. 轻型直流输电——一种新一代的 HVDC 技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-52.
- [6] 郑超, 周孝信. 基于普罗尼辨识的 VSC-HVDC 附加阻尼控制器的设计[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 7-12.
- [7] 胡兆庆. 基于 VSC 的 HVDC 控制及其动态特性研究[D]. 武汉:华中科技大学电气与电子工程学院, 2005.
- [8] 张桂斌, 徐政, 王广柱. 基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 17-22.
- [9] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京:科学出版社, 1992.
- [10] 卢强, 王仲鸿, 韩英铎. 输电系统最优控制[M]. 北京:科技出版社, 1984.

## 作者简介:

黄北军(1983~), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统功角稳定与控制。

邹超(1983~), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 从事新型直流输电及电力系统稳定方面的研究。

王奔(1960~), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统非线性及变结构控制。

(收稿日期: 2007-12-03)