

向无源网络供电的 VSC - HVDC 系统无源控制研究

付永良,王 奔,陈新华,邓大磊
(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要: 推导了轻型高压直流(VSC - HVDC)输电系统的端口受控耗散哈密顿系统(PCHD)模型,针对向无源网络供电的VSC - HVDC系统提出了一种无源控制新方法。该方法将换流站模型VSC - HVDC系统等效成一个具有耗散性质的无源系统,通过互联与阻尼配置的方法设计无源控制器,追踪参考电流,实现对无源网络交流电压的恒定控制。最后,通过仿真实验验证了所设计的无源控制器的有效性。

关键词: 高压直流输电;电压源换流器;无源网络;无源控制器;互联与阻尼配置

Abstract: The port - controlled Hamilton with dissipation (PCHD) model is derived and a new passive control strategy is proposed for transmitting power to passive network by means of VSC - HVDC system. In the theory, the converter model of VSC - HVDC is equivalent to a dissipative passive system, and the passive controllers are designed by interconnection and damping configuration to trace the reference currents. Finally, the simulation results show that the proposed controller is effective.

Key words: HVDC transmission; voltage source converter; passive network; passive controller; interconnection and damping configuration

中图分类号: TM721 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013)03 - 0024 - 04

0 引言

随着可控关断型电力电子器件及 PWM 技术的发展,基于电压源换流器的柔性直流(VSC - HVDC)输电系统越来越受到人们的关注。与传统的 HVDC 相比,柔性直流输电系统具有可向无源网络供电、无换相失败风险、有功和无功功率可独立控制以及易于构成多端直流供电系统等优点^[1]。

目前,国内外学术界对 VSC - HVDC 的数学模型和控制策略已经进行了一些有益的研究和探索,包括采用控制交流侧电压和相位,进而控制交流侧电流的间接电流控制策略^[2,3];采用稳态逆模型,用前馈解耦的方式来实现系统电流快速跟踪和有功、无功功率独立调节的控制策略^[4],采用状态反馈精确线性化理论,来独立调节有功和无功功率的控制策略^[5],上述文献均没有对 VSC - HVDC 向无源网络供电进行详尽的研究。

针对 VSC - HVDC 向无源网络供电领域的应用^[6-8],建立向无源网络供电的 VSC - HVDC 端口受控的哈密顿模型,通过选择适当的能量函数和阻尼注入矩阵,设计无源控制器,并利用 Matlab 对所

设计的控制器进行了仿真验证。

1 VSC - HVDC 工作原理和数学模型

向无源网络供电的 VSC - HVDC 输电系统结构如图 1 所示,两端换流器均采用 VSC,具有相同的拓扑结构。图 1 中 U_{s1} 、 U_r 、 i_{s1} 分别为整流侧的电源电压、换流器的交流侧电压和电流; U_{s2} 、 U_i 、 i_{s2} 分别为逆变侧交流电压、换流器的交流电压和电流; R_1 、 L_1 和 R_2 、 L_2 分别为整流侧及逆变侧换流器的等效电阻和电感; C_1 、 C_2 、 R_{dc} 分别为直流侧两端电容和直流线路等效电阻; U_{dc1} 、 U_{dc2} 为直流侧两端直流电压。

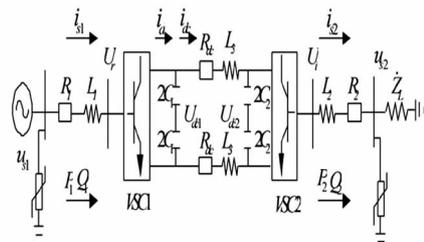


图 1 VSC - HVDC 向无源网络供电系统结构图

由于 VSC - HVDC 系统中的整流器和逆变器的电路结构相同,所以以整流侧电路为例,如图 2 所示,建立数学模型。

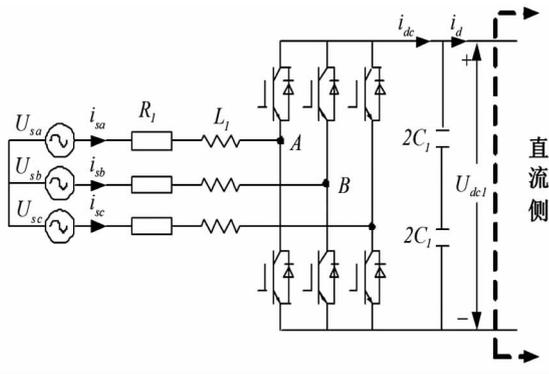


图2 三相电压型 PWM 换流器电路
换流器在 dq 旋转坐标下的数学模型 如下。

$$\begin{cases} L \frac{di_{sd}}{dt} = U_{sd} - S_d U_{dc1} + \omega L i_{sq} - R i_{sd} \\ L \frac{di_{sq}}{dt} = U_{sq} - S_q U_{dc1} - \omega L i_{sd} - R i_{sq} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 S_d, S_q 表示坐标变换后的开关函数; U_{rd}, U_{rq} 分别为 VSC 交流侧电压的 d、q 轴分量; U_{sq}, U_{sd} 、 i_{sq}, i_{sd} 分别为 U_{sabc}, i_{sabc} 变换后的对应的 d、q 轴分量。

2 PCH 模型与无源性控制

端口受控哈密顿系统(PCH)是无源性、耗散性理论研究的最新成果。考虑下面的计及耗散的 PCH 系统方程为

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x) u \quad (2)$$

式中 $x \in R^n$ 是状态矢量; $u \in R^m$ 代表输入矢量; $R(x)$ 为半正定对称矩阵,反映了端口上的附加阻尼; $J(x)$ 为斜对称阵,满足 $J(x) = -J^T(x)$,反映了系统内部的互联结构; $H(x)$ 为系统的 Hamiltonian 函数; $g(x) u$ 等效表示外部源输入。

为使系统渐进稳定在平衡点 x^* ,而加入控制函数,最终得到系统期望的能量函数,并设其为

$$H_d(x) = H(x) + H_a(x)$$

寻找一个反馈控制 $u = a(x)$,并调整互联和阻尼矩阵,使其闭环系统为

$$\dot{x} = [J_d(x) - R_d(x)] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \quad (3)$$

$J_d(x), R_d(x)$ 为期望的互联矩阵和阻尼矩阵 $H_a(x)$ 为待定的能量函数,反映了通过控制输入系统的能量。为在期望的平衡点达到系统稳定,要求 $H_d(x)$ 在期望的平衡点取最小值。

如果找到函数 $\alpha(x), J_a(x), R_a(x)$ 以及矢量函数 $K(x)$ 满足:

$$[J_d(x) - R_d]K(x) = -[J_a(x) - R_a] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + gu \quad (4)$$

并满足如下的条件。

(1) 保持结构性

$$J_d(x) = J_a(x) + J(x) = -[J_a(x) + J(x)]^T$$

$$R_d(x) = R_a(x) + R(x) = [R_a(x) + R(x)]^T$$

(2) 可积性

$$\frac{\partial K(x)}{\partial x} = \left[\frac{\partial K(x)}{\partial x} \right]^T$$

(3) 平衡点指定

$$K(x^*) = -\frac{\partial H(x^*)}{\partial x}$$

(4) Lyapunov 稳定性: 在期望平衡点 x^* 处,

$K(x)$ 的雅可比式应满足以下边界条件。

$$\begin{cases} \frac{\partial K(x^*)}{\partial x} > -\frac{\partial^2 H(x^*)}{\partial x^2} \\ u = \alpha(x) \\ H_d(x) = H(x) + H_a(x) \\ \frac{\partial H_a(x)}{\partial x} = K(x) \end{cases}$$

那么闭环系统式(3)为端口受控耗散哈密顿系统(PCHD),并在平衡点 x^* 处,闭环系统是稳定的。

由 $K(x) = \frac{\partial H_a(x)}{\partial x}$ 可知,反馈控制器便可由式(4)求出。

3 控制器设计

3.1 整流侧控制器设计

为实现电流的有效控制,采用基于互联与阻尼配置的无源控制方法,将系统式(1)改写成端口受控的哈密顿系统^[9],即

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x) u$$

其中,

$$J(x) = \begin{bmatrix} 0 & wL \\ -wL & 0 \end{bmatrix} \quad R(x) = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} U_{sd} - S_d U_{dc1} \\ U_{sq} - S_q U_{dc1} \end{bmatrix}$$

为实现电流的快速跟踪,建立误差系统,令: \tilde{x}

$$= [Li_{sd} = Li_{sd}^* \quad Li_{sq} - Li_{sq}^*]^T$$

并定义误差系统的哈密顿函数为

$$H_d(x) = \frac{1}{2} \tilde{x}^T D^{-1} \tilde{x}$$

并设

$$J_a(x) = \begin{bmatrix} 0 & -J_a \\ J_a & 0 \end{bmatrix} \quad R_a(x) = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix}$$

$$K(x) = \frac{\partial H_a(x)}{\partial x} = \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} - \frac{\partial H(x)}{\partial x} = -D^{-1} x^*$$

将上式带入公式(4)中就可以计算得到如下的控制率。

$$\begin{cases} S_d = \frac{U_{sd} + r_1 i_{sd} + j_a i_{sq} - (R + r_1) i_{sd}^* + (\omega L - J_a) i_{sq}^*}{U_{dc1}} \\ S_q = \frac{U_{sq} + r_2 i_{sq} - J_a i_{sd} - (R + r_2) i_{sq}^* - (\omega L - J_a) i_{sq}^*}{U_{dc1}} \end{cases} \quad (5)$$

VSC-HVDC 系统正常工作的必要条件就是保持直流侧电压的稳定,设计控制器时,整流侧采用定直流电压和定无功功率控制。

根据瞬时功率理论,并忽略换流电抗器电阻和开关损耗时,换流站的无功功率和直流侧的有功功率的表达式如下。

$$\begin{cases} Q_1 = Q_s = \frac{3}{2} (U_{sq} i_{sd} - U_{sd} i_{sq}) \\ P_1 = P_{dc} = U_{dc1} \cdot i_d \end{cases} \quad (6)$$

VSC-HVDC 为三相平衡系统,令交流电源 a 相相电压的初相角为 0° ,有: $U_{sd} = U_s, U_{sq} = 0, U_s$ 为一个恒定值,所以有功功率、无功功率可以通过调节 $i_{sd}、i_{sq}$ 独立来控制。当给定无功功率和直流侧电压的参考值 $Q_{ref}、U_{dc1ref}$,由式(6)得到电流的预估值 $i'_{sd}、i'_{sq}$,为了消除稳态误差,通过 PI 调节器,把实际测得的无功功率以及直流侧电压值和给定参考值之间的偏差转化为修正值 $\Delta i_{sd}、\Delta i_{sq}$,然后用相应的预估值加上修正值,从而得到内环参考电流 $i_{sd}^*、i_{sq}^*$ 。整流侧控制框图如图 3 所示。

3.2 逆变侧控制器设计

向无源网络供电的换流器应提供稳定的交流电压,即频率电压幅值恒定,因此逆变侧采用定交流电压。取逆变侧交流电压 U_{2d} 的方向为 d 轴方向,即 $U_{s2d} = U_{s2}, U_{s2q} = 0$ 。则稳定状态下逆变侧 VSC 的数学模型为

$$\begin{cases} U_{i2d} = U_{s2d} + \omega L i_{sq} - R i_{sd} = U_{s2} + \omega L i_{sq} - R i_{sd} \\ U_{i2q} = U_{s2q} - \omega L i_{sd} - R i_{sq} = \omega L i_{sq} - R i_{sd} \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)与 PI 控制器可得逆变侧定交流电压控制器如图 4 所示。

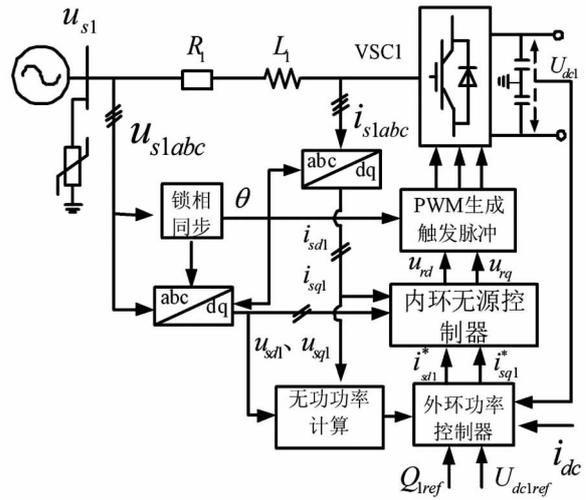


图 3 整流侧控制框图

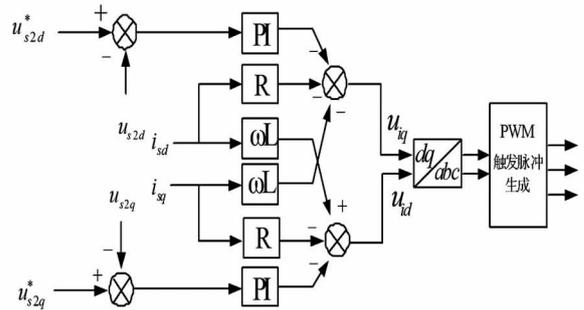


图 4 逆变侧控制框图

4 仿真分析

为验证所设计的控制器有效性,在 Matlab 中搭建了图 1 所示的向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统。主要参数如下:系统整流端母线额定电压及无源网络母线电压 $U_{s1} = U_{s2} = 10 \text{ kV}$,直流侧直流电压的设定值为 $U_{dc} = 15 \text{ kV}$,交流侧电感 $L_1 = L_2 = 10 \text{ mH}$,交流侧电阻 $R = 0.2 \Omega$,直流侧等效电阻 $R_{dc} = 0.5 \Omega$,直流侧电容 $C_1 = C_2 = 7 \text{ mF}$,开关频率为 5000 Hz ,换流器额定功率为 25 MW 。采用标么值表示,换流站交流侧基准电压为 8.16 kV ;直流侧电压基准值为 15 kV ,交流侧基准功率为 10 MW 。整流侧外环的 PI 控制器及无源性控制器的参数分别为

$$K_{p1} = 20 \quad k_{i1} = 1; K_{p2} = 30 \quad K_{i2} = 3; r_1 = 10 \quad r_2 = 10$$

正常稳态工作时,设无源网络为纯电阻负荷,起始负荷为 10 MW ;整流侧的直流侧电压定值为 1.0 ,无功功率定值为 0 。

设整流侧无功功率在 0.8 s 时阶跃至 -0.2 p.u. ,

1.0 s 时无功功率阶跃至 0.2 p. u. ,1.8 s 时令纯电阻负荷增加到 20 MW ,仿真结果如图 5、6 所示。

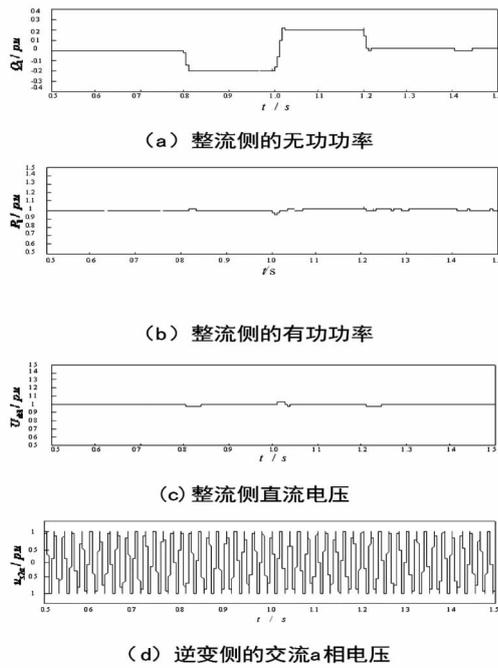


图5 无功阶跃的仿真波形

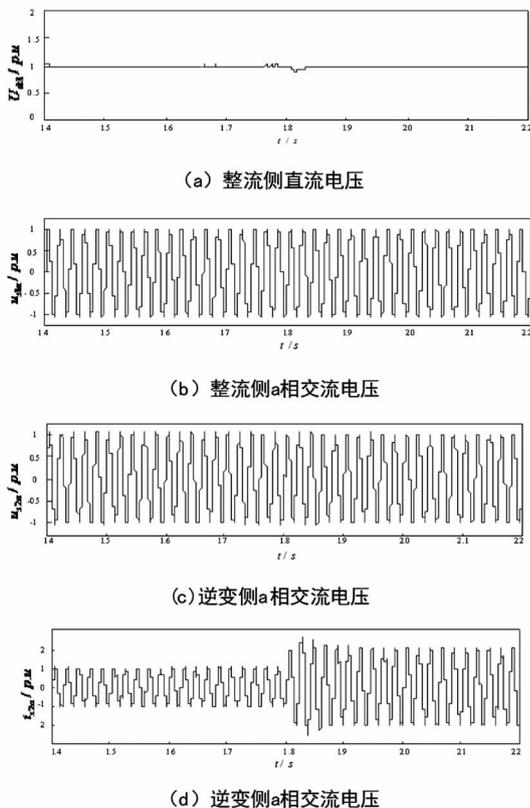


图6 负载变化的仿真波形

通过仿真实验可以得出 ,整流侧发生无功功率阶跃时 ,VSC - HVDC 系统能够向无源网络提供稳定的交流电压 ;无源网络电阻负荷发生变化时 ,整流侧交流系统电压没有变化 ,直流侧电压仅发生小幅

度的波动 ,且快速恢复到稳定状态 ;逆变侧三相交流电压有略微的波动 ,但迅速恢复至给定值。

5 结 论

首先建立了向无源网络供电的 VSC - HVDC 输电系统的数学模型 ,整流侧外环采用定直流侧电压和定无功功率来生成内环参考电流 ;内环采用基于互联与阻尼配置的无源控制器来实现对参考电流追踪 ;逆变侧采用定交流电压的控制策略 ,实现向无源网络的可靠性供电 ,仿真结果表明 ,所设计的无源性控制器能够满足向无源网络供电的要求。

参考文献

- [1] 陈谦,唐国庆,胡铭.采用 d q o 坐标的 VSC - HVDC 稳态模型与控制器设计[J].电力系统自动化,2004,28(16):61 - 66.
- [2] 陈海荣,徐政.基于同步旋转坐标变换的 VSC - HVDC 暂态模型及其控制器[J].电工技术学报,2007,22(2):121 - 126.
- [3] 陈海荣,徐政.向无源网络供电的 VSC - HVDC 系统的控制器设计[J].中国电机工程学报,2006,26(23):42 - 48.
- [4] 李国栋,毛承雄,陆继明,等.基于逆系统理论的 VSC - HVDC 新型控制[J].高电压技术,2005,31(1):45 - 50.
- [5] Jovcic D, Lamont L, Abbott K. Control System Design for VSC Transmission[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(7):721 - 729.
- [6] 梁海峰,李庚银,李广凯,等.向无源网络供电的 VSC - HVDC 系统仿真研究[J].电网技术,2005,29(8):45 - 50.
- [7] 包宗贤,邹超.向无源网络供电的 VSC - HVDC 系统的新型控制器设计[J].电力系统保护与控制,2008,36(14):22 - 27.
- [8] 杨用春,赵成勇.向无源网络供电的 VSC - HVDC 控制性能实验研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(21):31 - 35,66.
- [9] 王久和.电压型 PWM 整流器的非线性控制[M].北京:机械工业出版社,2008.

作者简介:

付永良(1987),男,硕士研究生,从事新型高压直流输电方面的研究;

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

陈新华(1987),女,硕士研究生,从事电能质量控制的相关研究;

邓大磊(1987),男,硕士研究生,研究方向为电能质量控制。(收稿日期:2013 - 02 - 29)