

一种优化协调控制策略在 VSC HVDC 中应用

胡兆庆, 毛承雄, 陆继明, 常东旭

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 随着大功率电力电子技术的发展和可工作在高频率开关状态的完全可控器件(如大功率 IGBT, IGCT 等)的出现,使得电压源型直流输电(VSC HVDC)成为现实,这种新型的直流输电技术和传统直流输电相比,体现了诸多优点。该文建立了一种适合于研究 VSC HVDC 基频下的运行与控制特性的 VSC HVDC 模型,并将该模型方程与电力系统微分代数方程统一起来。在此基础上提出一种 VSC HVDC 与发电机励磁协调控制策略,在 AC/DC 交直流混合系统中研究了该控制方式对各自的影响,仿真表明,采用该优化协调控制,发电机和 HVDC 在系统发生故障或者扰动后都能够快速恢复正常稳定运行,且该控制方式对于系统参数变化具有一定鲁棒性。

关键词: 电压源; 直流输电; 模型; 优化协调控制

中图分类号: TM721.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)04-0001-05

0 引言

大功率电力电子技术的发展使得完全可控器件,如 IGBT、IGCT 等在电压源型直流输电(VSC HVDC)中得到应用,如 ABB 提出的 HVDC Light^[1]即是这种电压源型直流输电,它采用 PWM 控制方式,从电力系统角度来看,就像一个没有惯性的发电机,并且有功和无功可解耦控制,并且这种控制是可以瞬间完成。VSC HVDC 这种特点给电力系统带来了许多优点^[2,3]。通常 HVDC 系统可用电磁暂态的方法来研究,但在有机电暂态的交直流混合系统中,这种方法具有一定局限性,而且从电力系统角度来看,我们通常只关心 HVDC 在基频下的运行和控制功能,本文建立了适合于研究交直流混合系统中交直流之间相互作用的 VSC HVDC 模型,该模型忽略内部开关过程,考虑交直流系统之间相互作用。在建立模型基础上,提出一种发电机励磁和 VSC HVDC 协调控制方案,仿真结果证明,在该控制方式下,当系统发生故障或者受到扰动后,发电机和直流输电系统均能快速恢复正常运行,并且对系统参数变化具有一定鲁棒性。

1 详细模型

如图 1 所示 AC/DC 混合交直流系统,发电机通过交流双回线路以及 VSC HVDC 同无穷大电网系统相连,交流线路可用等效电抗 x_L 表示,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_N 表示,中间直流线路用电感 L_2 、电阻 R_d 表示, C_1 、 C_2 分别表示两侧直流平波电容,这是不同于传统直流输电的地方,后者用电感进行平波,电容电压分别为 u_{C1} 、 u_{C2} ,直流电流为 i_{L2} ,两侧交流电流为 I_{L1} 、 I_{L3} ,参考方向如图 1 所示, x_1 、 x_2 分别为两侧等效换相电抗。系统公共参考坐标系选择无穷大母线电压为参考,因此电压相量用 V_s 表示,发电机高压母线侧电压用相量 V_1 表示。图 1 中整流和逆变两侧在考虑准稳态的情况下,用等效单相等值原来三相电路,所以方程也用单相等值的形式写出。

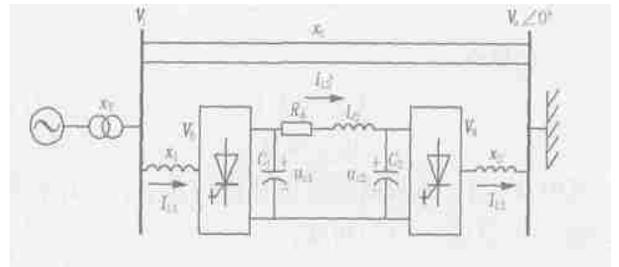


图 1 有 VSC HVDC 的 AC/DC 系统示意图

Fig. 1 Diagram of AC/DC power system with VSC HVDC

整流逆变两侧交流电压相量形式为^[4]:

$$V_R = \frac{u_{c1}}{\sqrt{2}} m_1 \quad 1 \quad (1)$$

$$V_N = \frac{u_{c2}}{\sqrt{2}} m_2 \quad 2 \quad (2)$$

其中: m_1 、 m_2 为调制度; 1 、 2 为调制波相角。

换流站输出交流两侧动态可用如下代数方程描

基金项目: 教育部优秀青年教师资助计划项目

述:

$$V_1 = j x_1 I_{L1} + V_R \quad (3)$$

$$V_s = -j x_2 I_{L3} + V_N \quad (4)$$

假定换流站是理想的,则有:

$$C_1 \frac{d u_{c1}}{d t} = \frac{\operatorname{Re}(V_R \hat{I}_{L1})}{u_{c1}} - i_{L2} \quad (5)$$

$$u_{c1} = R_d i_{L2} + L_2 \frac{d i_{L2}}{d t} + u_{c2} \quad (6)$$

$$C_2 \frac{d u_{c2}}{d t} = -\frac{\operatorname{Re}(V_N \hat{I}_{L3})}{u_{c2}} + i_{L2} \quad (7)$$

以上方程中各量的含义见图 1 所示, Re 表示实部。

式(1)~(7)中各量用实名值表示,但通常电力系统方程用标么值较为方便,所以需要将式(1)~(7)转化成标么值形式,以便和电力系统方程相统一。

中间直流电压可以选择两个电容上电压之一为电压基准值,为方便,本文选择 u_{c1} 的最大值 $u_{c1\max}$ 为直流电压基准,传输额定容量 S_B 为功率基准,直流电流基准可表示为:

$$i_{L2B} = \frac{S_B}{u_{c1\max}} \quad (8)$$

由式(1)、(2)可知,当 $u_{c1} = u_{c1\max}$, $m_1 = 1$, 相量 V_R 幅值 V_R 达到最大值:

$$V_{R\max} = \frac{u_{c1\max}}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

同理:

$$V_{N\max} = \frac{u_{c2\max}}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

如果令:

$$V_{R\max} = k_1 V_{N1} \quad (11)$$

$$V_{N\max} = k V_{N2} \quad (12)$$

其中: V_{N1} 、 V_{N2} 为两侧交流电压额定值; k_1 、 k 为常数。由式(9)~(12)可知:

$$V_{N1} = \frac{u_{c1\max}}{\sqrt{2} k_1} \quad (13)$$

$$V_{N2} = \frac{u_{c2\max}}{\sqrt{2} k} \quad (14)$$

式(1)、(2)两边分别除以式(13)、(14),化为标么值形式:

$$V_R^* = k_1 u_{c1}^* m_1 \quad (15)$$

$$V_N^* = k_2 u_{c2}^* m_2 \quad (16)$$

其中: $k_2 = k u_{c1\max} / u_{c2\max}$ 。

式(5)两边同时乘以 u_{c1} ,得到:

$$C_1 u_{c1} \frac{d u_{c1}}{d t} = \operatorname{Re}(V_R \hat{I}_{L1}) - u_{c1} i_{L2} \quad (17)$$

式(17)两边同时除以 S_B 后左边可化为:

$$\frac{C_1 u_{c1\max}^2}{S_B} \frac{u_{c1}}{u_{c1\max}} \frac{d}{d t} \left(\frac{u_{c1}}{u_{c1\max}} \right) = T_{c1} U_{c1}^* \frac{d u_{c1}^*}{d t} \quad (18)$$

其中: T_{c1} 是为方便引入的常数,且 $T_{c1} = \frac{C_1 u_{c1\max}^2}{S_B}$ 。

由式(8)可知,式(17)右边标么值形式和实名值形式一致,所以式(5)标么值形式为:

$$T_{c1} u_{c1}^* \frac{d u_{c1}^*}{d t} = \operatorname{Re}(V_R^* \hat{I}_{L1}^*) - i_{L2}^* u_{c1}^* \quad (19)$$

同理式(6)标么值形式:

$$u_{c1}^* = R_d^* i_{L2}^* + L_2^* \frac{d i_{L2}^*}{d t} + u_{c2}^* \quad (20)$$

其中: $R_d^* = R_d / R_{dB}$; $R_{dB} = u_{c1\max}^2 / S_B$; $L_2^* = L_2 / R_{dB}$, 式(7)标么值形式:

$$T_{c2} u_{c2}^* \frac{d u_{c2}^*}{d t} = -\operatorname{Re}(V_N^* \hat{I}_{L3}^*) + i_{L2}^* u_{c2}^* \quad (21)$$

其中: $T_{c2} = C_2 u_{c2\max}^2 / S_B$

式(3)、(4)为代数方程,所以标么值形式和实名值方程形式一致。

综上,式(1)~(7)标么值形式为式(15)、(16)、(19)、(20)、(21)。以上标么值方程是相量形式,需要投影到同步参考坐标系 $x-y$ 下。如果忽略标么值符号*,直流输电系统可用以下微分方程描述:

$$\frac{d u_{c1}}{d t} = \frac{k_1 m_1 \cos \alpha_1 V_{1y} - k_1 m_1 \sin \alpha_1 V_{1x}}{T_{c1} x_1} - \frac{i_{L2}}{T_{c1}} \quad (22)$$

$$\frac{d i_{L2}}{d t} = \frac{u_{c1}}{L_2} - \frac{u_{c2}}{L_2} - \frac{R_d i_{L2}}{L_2} \quad (23)$$

$$\frac{d u_{c2}}{d t} = \frac{i_{L2}}{T_{c2}} - \frac{k_2 m_2 \sin \alpha_2 V_s}{T_{c2} x_2} \quad (24)$$

其中: V_{1x} 、 V_{1y} 表示相量 V_1 在同步坐标系 x 和 y 轴上的分量。

发电机采用简化三阶模型,发电机方程通常写成在 $d-q$ 轴的形式,为统一起见,需将 $d-q$ 轴方程转化到公共参考坐标系 $x-y$ 下^[5]。可写为如下形式:

$$x = f(x, V_1) \quad (25)$$

其中: $x = [e_q]^T$; $V_1 = [V_{1x} \quad V_{1y}]^T$; 为发电机功角,在这里定义为发电机 q 轴与公共坐标系 x 轴之间夹角^[5]; ω 为角速度; e_q 为 q 轴瞬变电动势; V_{1x} 、 V_{1y} 为图 1 中相量 V_1 在公共坐标系的投影。该分量可以用系统状态量以及控制量表示:

$$V_{1x} = g_1(x, u_{c1}, m_1) \quad (26)$$

$$V_{1y} = g_2(x, u_{c1}, m_1) \quad (27)$$

式中: g_1, g_2 是较为复杂的代数式,在这里不列举出来。

2 控制设计

将式(26)、(27)代入式(22)~(25)后得到:

$$X = F(X, m_1, m_2, E_{fd}) \quad (28)$$

$$X = [u_{c1} \quad i_{L2} \quad u_{c2} \quad x]^T$$

$$x = [e_q]$$

式中: X 为系统状态量; m_1, m_2 为整流和逆变站对应的控制量; E_{fd} 为发电机励磁电压。

式(28)线性化得到:

$$\dot{X} = A X + B u \quad (29)$$

其中:

$$X = [u_{c1} \quad i_{L2} \quad u_{c2} \quad x]^T$$

$$x = [e_q]$$

$$u = [m_1 \quad m_2 \quad E_{fd}]^T$$

表示与式(28)中对应的变量的增量

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X} \right|_{x=x_0, u=u_0}, \quad B = \left. \frac{\partial F}{\partial u} \right|_{x=x_0, u=u_0}$$

其中: x_0, u_0 为系统初始运行点的值。

根据线性最优理论^[6],采用二次型最优控制规律来进行控制设计,选择性能指标 J :

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (X^T Q X + u^T R u) dt \quad (30)$$

其中: Q, R 为权矩阵, R 一般可以取为单位阵。

最优控制规律为:

$$u = -K X \quad (31)$$

其中:

$$K = R^{-1} B^T P \quad (32)$$

P 是下列黎卡锡方程的解:

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (33)$$

式(30)中性能指标的权矩阵 Q 选取对于系统的控制特性有很大影响,一般可以通过调整 Q 阵对角线相应的元素来调整对应的状态量的阻尼。

3 仿真结果

仿真针对图1所示 AC/DC 混合系统,系统采用本文设计的控制,设置以下故障或者扰动 1)~5),考察控制器对交直流系统各自影响。

1) 0.5 s 时无穷大母线处发生三相短路故障,0.1 s 后故障切除,系统各量响应曲线见图 2(a)~(e)。

2) 0.5 s 时交流双回线路其中一条因故障跳开,单回线路运行 3.5 s 后恢复双回线路运行,图 3(a)~(c)。

3) 0.5 s 时 VSC HVDC 整流侧直流电压阶跃 2.5%,图 4(a)~(c)。

4) 0.5 s 时发电机原动机功率上升 5%,图 5(a)~(c)。

5) 0.5 s 时直流系统有功反向,图 6(a)~(d)。

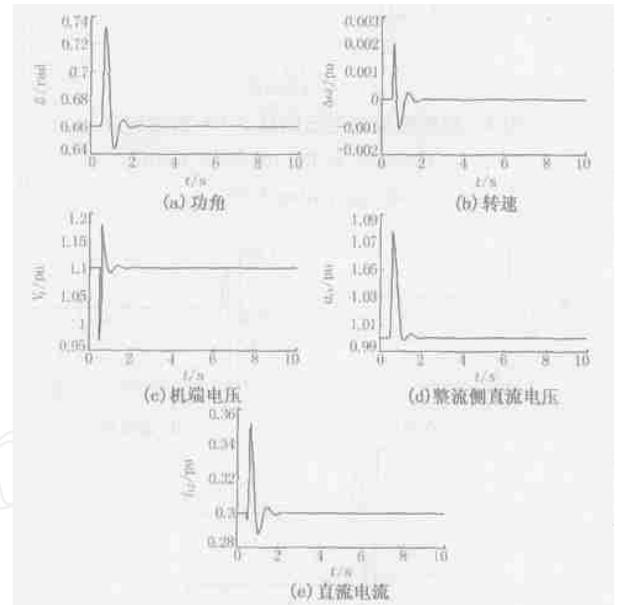


图 2 无穷大母线处发生三相短路故障时系统响应

Fig. 2 Response to three-phase short circuit fault at infinite bus

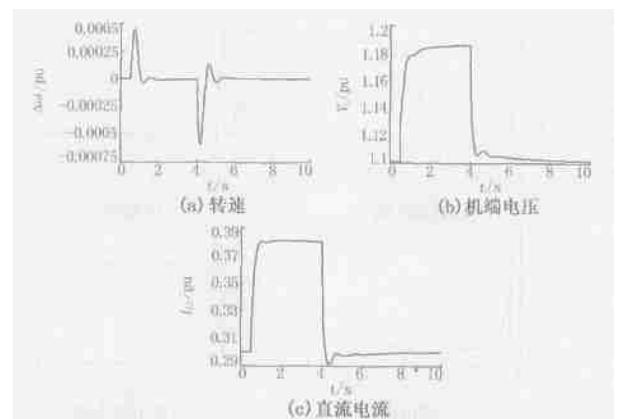


图 3 跳开一条线路然后再合上系统响应

Fig. 3 Response to one line opening and closing

由图 2 可以看出,当系统发生故障时,发电机和直流输电系统均能快速正常运行,相互之间并没有产生不利影响,图 3 则显示控制对于系统参数的变化具有一定鲁棒性,图 4、5、6 表明,当 VSC HVDC 系

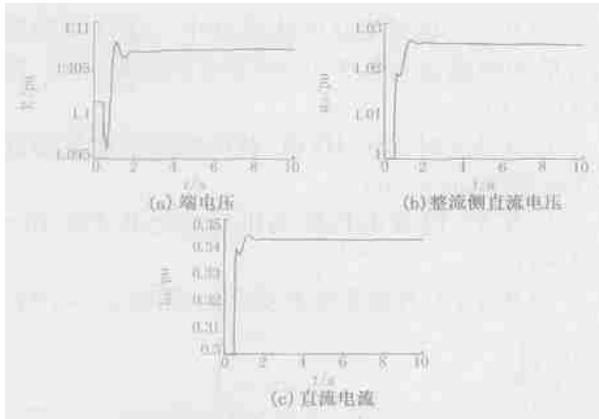


图4 整流侧直流电压阶跃 2.5% 系统响应

Fig. 4 Response to DC voltage of rectifier side increasing 2.5 %

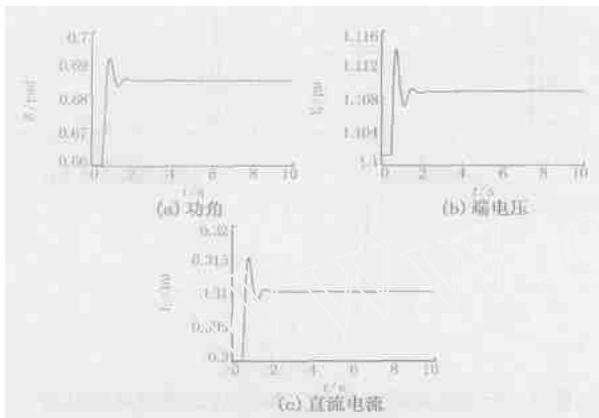


图5 原动机功率阶跃 5% 响应

Fig. 5 Response to power of prime mover increasing 5 %

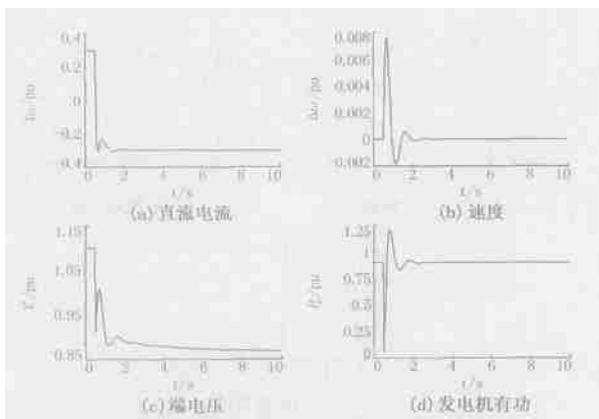


图6 直流系统有功反转系统响应

Fig. 6 Response to active power reverse of VSC HVDC

统或者发电机运行状态发生改变时,不影响彼此稳定性,图6显示 VSC HVDC 调节系统潮流的能力,当有功反向传输后,直流电流方向反向(图 6(a)),并且这种调节瞬间可以完成。

4 结论

本文建立了适合于研究交直流混合系统中 VSC HVDC 在基频下运行和控制特性的详细模型,在建立模型的基础上,提出一种 VSC HVDC 与发电机励磁优化协调控制方案,仿真表明,在该控制方式下,当系统发生故障或者扰动时,交直流系统之间不会产生不利影响,且对系统参数变化具有一定鲁棒性,同时显示 VSC HVDC 对于系统潮流灵活调节能力,且当发电机或者 VSC HVDC 系统运行状态变化时,对各自稳定性没有影响。

附录:仿真参数

发电机参数:

$$x_d = 0.3186, x_d' = 0.9875, x_q = 0.5502,$$

$$T_{d0} = 6.7, M = 9.0$$

VSC HVDC 参数:

$$k_1 = 1.7, k_2 = 1.5, T_{c1} = 0.5, T_{c2} = 0.6, x_1 = 0.12,$$

$$x_2 = 0.312, R_d = 0.5, L_2 = 0.01$$

线路和变压器参数:

$$x_L = 0.25, x_T = 0.2$$

参考文献:

- [1] 李永坚,周友庆,宋强. 轻型直流输电技术的发展与应用[J]. 高电压技术, 2003, 29(10): 26-28.
LI Yong-jian, ZHOU You-qing, SONG Qiang. HVDC Light the Development and Application of HVDC Light Technology [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(10): 26-28.
- [2] H rle N, Eriksson K, Maeland A, et al. Electrical Supply for Offshore Installations Made Possible by Use of VSC Technology[A]. Presented at CigréConference. Paris:2002. 225-230.
- [3] Eriksson K, Jonsson T, Tollerz O. Small Scale Transmission to AC Networks by VSC HVDC[A]. 12th Cepsi Conference. Pattaya:1998. 302-307.
- [4] 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.
ZHANG Gui-bin, XU Zheng, WANG Guang-zhu. Steady-state Model and Its Nonlinear Control of VSC HVDC System [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 17-22.
- [5] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Theory and Analysis of Dynamic Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [6] Yu YN. Electric Power System Dynamics[M]. New York: A

cademic Press,1983.

flashdancer @163.com

收稿日期: 2004-07-05

作者简介:

胡兆庆(1976 -) ,男,博士研究生,从事大功率电力电子技术
在电力系统中应用及发电机励磁控制研究; E-mail :

毛承雄(1964 -) ,男,教授,博士生导师,研究方向为同
步发电机微机励磁控制及电力系统并行仿真计算;
陆继明(1957 -) ,男,副教授,研究方向为电力系统运行
和控制。

Application of an optimal coordinated control strategy to VSC HVDC

HU Zhao-qing, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, CHANG Dong-xu

(College of Electrical & Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the development of power electronics and complete controllable components such as IGBT, IGCT in the condition of high frequency switching, VSC (Voltage Source Converter) HVDC is designed. Compared with conventional HVDC, it has many merits. A model of VSC HVDC, which is fit for researching the operation and control characteristics of VSC HVDC under its fundamental frequency, is established. And the equations of model is integrated with DA (Differential-Algebraic) equations of power system. An optimal coordinated control strategy between generator and VSC HVDC system is proposed based on established model, and the influence of control on both of them is reviewed in a AC/DC hybrid power system. The simulation results verify that, with the proposed optimal coordinated control, both the generator and the HVDC system can recover rapidly and work normally after the system faults or disturbance. In addition, it has robustness to the parameter variety of power system.

Key words: VSC; HVDC power transmission; model; optimal coordinated control

全国电网介绍

改革开放以来,电力工业实行“政企分开,省为实体,联合电网,统一调度,集资办电”的方针,大大地调动了地方办电的积极性和责任,迅速地筹集资金,使电力建设飞速发展。从1988年起连续11年每年新增投产大中型发电机组超过10 000 MW,按全国统计口径达15 000 MW。各大区电网和省网随着电源的增长加强了网架建设,从1982到1999年底,全国新增35 kV以上输电线路372 837 km,新增变电容量732 690 MVA,而1950至1981年30年期间新增输电线路为277 257 km,变电容量70 360 MVA。

目前我国基本上已进入大电网、大电厂、大机组、高电压输电、高度自动控制的新时代。电网发展的主要标志是:

1) 我国现有发电装机容量在2 000 MW以上的电力系统11个,其中东北、华北、华东、华中电网装机容量均超过30 000 MW,华东、华中电网甚至超过40 000 MW,西北电网的装机容量也达到20 000 MW。南方电力联营系统联结广东、广西、贵州、云南四省电网,实现了西电东送。其它几个独立省网,如四川、山东、福建等电网和装机容量也超过或接近10 000 MW。

2) 各电网中500 kV(包括330 kV)主网架逐步形成和壮大。220 kV电网不断完善和扩充,到1999年底220 kV以上输电线路总长达495 123 km,变电容量达593 690 MVA。其中500 kV线路(含直流线路)达22 927 km,变电容量达80 120 MVA。

3) 1990年我国第一条从葛洲坝水电站至上海南桥换流站的 ± 500 kV直流输电线路实现双极运行,使华中和华东两大区电网实现非同期联网。

4) 随着500 kV网架的形成和加强,网络结构的改善,电力系统运行的稳定性得到改善。近10年间系统稳定破坏事故比前10年下降了60%以上。

5) 省级以上电网现代化的调度自动化系统基本实现了实用化。

6) 以数据通信为特征的覆盖全国各主要电网的电力专用通信网基本形成。