

文章编号:1671-251X(2013)06-0085-06

DOI:

梁克靖,郭家虎,李鹏鹏. 基于 DIgSILENT/PowerFactory 的轻型直流输电系统建模和仿真[J]. 工矿自动化,2013,39(6):85-90.

基于 DIgSILENT/PowerFactory 的 轻型直流输电系统建模和仿真

梁克靖, 郭家虎, 李鹏鹏

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:介绍了轻型直流输电系统的结构特点,建立了基于电力系统仿真软件 DIgSILENT/PowerFactory 的轻型直流输电系统模型,分析了基于同步 $d-q$ 旋转坐标系下的电压源换流器的稳态数学模型和直流电压、有功功率和无功功率的控制策略,对系统在直流电压、有功功率及无功功率变化条件下的动态性能进行了仿真。仿真结果表明,该系统具有很好的动态响应能力和鲁棒性,可以稳定工作于2个电网之间,独立控制无功功率达到静态无功补偿的作用。

关键词:轻型直流输电; 电压源换流器; 控制策略; 无功功率; 静态无功补偿; DIgSILENT/PowerFactory

中图分类号:TD612

文献标志码:A

网络出版时间:

网络出版地址:

Modeling and simulation of HVDC-Light system based on DIgSILENT/PowerFactory

LIANG Ke-jing, GUO Jia-hu, LI Peng-peng

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology,
Huainan 232001, China)

Abstract: The paper introduced structure characteristics of HVDC-Light system, built model of HVDC-Light system based on power system simulation software DIgSILENT/PowerFactory, analyzed steady state mathematical model of voltage source converter based on synchronous $d-q$ rotating coordinate system and control strategy of DC voltage, active power and reactive power, and simulated dynamic performance under condition of change of the DC voltage, active power and reactive power. The simulation results show that the system has good ability of dynamic response and robustness, can steady work between two power grids, and independently control reactive power to compensate static reactive power.

Key words: HVDC-Light; voltage source converter; control strategy; reactive power; compensation of static reactive power; DIgSILENT/PowerFactory

0 引言

风力发电、光伏发电场一般建于地广人稀,风、光资源充足的地区,由于其装机容量小、分布分散、传输距离远,若采用传统的交流并网,随着输送容量

的不断增长,需要采取静止补偿、串联补偿、调相机等措施增强输电线路的稳定性。而且,随着输电距离的增加,需要设置中间开关站来满足其稳定、过电压等要求。尤其在远距离和超远距离输电方面,由于直流输电的网损比交流小得多,采取直流输电线

收稿日期:2013-03-18。

基金项目:安徽省杰出青年基金项目(1108085J03)。

作者简介:梁克靖(1987—),男,安徽淮南人,硕士研究生,研究方向为新能源,E-mail:306291259@qq.com。

路的成本则比交流输电线路低得多^[1]。因此,采用方便集成、拓展的直流输电技术,则更能有效地利用新能源。而 DIgSILENT/PowerFactory 作为一种面向对象的电力系统仿真软件,在轻型直流输电(HVDC-Light)的建模仿真方面更为方便快捷,它集成了各种电力系统元件模块,可以直接用于构建 HVDC-Light 系统模型。

1 HVDC-Light 系统的结构特点

HVDC-Light 系统的结构简单,主要包括电压源型换流站和入地电缆,如图 1 所示。其中换流站结构如图 2 所示,主要包括了换流变压器、换流电抗器、交流滤波器、电压源型换流器(VSC)、直流电容、直流电缆^[2]。图 2 中, I_d 为输电线路直流电流; U_{dc} 为直流电压; U_r 为逆变器端电压; U_g 和 i 分别为逆变侧电网电压和电流; Z 为逆变器等效电抗,由等效电感 L 与等效电阻 R 组成, $Z=L+R$ 。由于采用了绝缘栅双极晶体管 IGBT 的 VSC,再配合正弦脉宽调制(SPWM)技术,系统产生的谐波大为减弱,所需无功补偿的容量也大大减少。HVDC-Light 系统既可以向有源网络供电,也可以向无源网络供电。正常运行时,VSC 可以独立地控制有功功率和无功功率,使控制更加方便简洁。而且 VSC 还能够起到静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)的作用,动态补偿交流母线的无功功率,稳定交流母线电压^[3-4]。

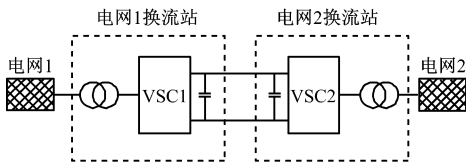


图 1 HVDC-Light 系统结构

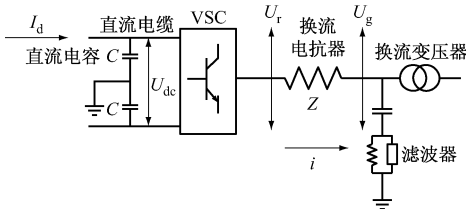


图 2 换流站结构

2 基于 DIgSILENT/PowerFactory 的 HVDC-Light 系统模型

DIgSILENT/PowerFactory 包含了全面的电力系统元件的模型库,包括发电机、变压器、VSC、线路、电容电抗等设备的模型,其中直流输电电气部分

所使用到的模型,如整流器、逆变器等都包含在已有模型库的标准元件中。VSC 控制系统采用软件自带的动态仿真语言——DSL 语言。基于 DIgSILENT/PowerFactory 的 HVDC-Light 系统模型如图 3 所示。

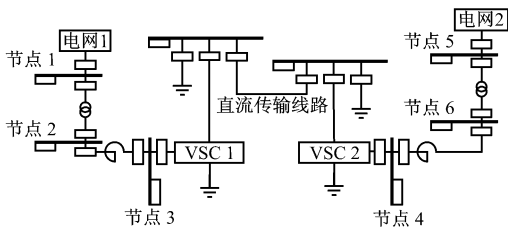


图 3 基于 DIgSILENT/PowerFactory 的 HVDC-Light 系统模型

3 HVDC-Light 系统的控制策略分析

目前,HVDC-Light 系统采用的控制策略有 2 种:一种是基于同步旋转坐标系下的直接电流控制策略,另一种是基于电压幅值和相位控制的间接电流控制策略^[5-6]。参考文献[7]中提到直接电流控制策略具有动态响应快、能实现限流等良好的控制性能。参考文献[8]中分别描述了 HVDC-Light 系统中 VSC 的 4 种基本控制方式。参考文献[9]中阐述了间接电流控制的方法,通过控制电压相位与幅值来达到调节直流电压、电流及无功功率的目的,并建立了 VSC-HVDC 系统的稳态模型。

本文通过建立同步 $d-q$ 旋转坐标系 VSC 的稳态数学模型,结合 SPWM 技术,在 DIgSILENT/PowerFactory 的软件平台上构建了与之对应的控制系统,实现了对 HVDC-Light 系统直流电压、有功功率、无功功率的独立控制。

当交流侧连接到有源网络时,必须要考虑 VSC 对交流侧系统的影响,因此,控制 VSC 输出和吸收的有功功率 P 和无功功率 Q 就很有必要。而直流线路上的电压变化又会对有功功率产生影响,所以对于一个两边对称设置的 HVDC-Lihgt 系统来说,就可以采用一边控制直流电压,而另一边控制有功功率的控制方法^[10]。当电压 U_s 取值分别为 0.9、1.0、1.1 倍的标么值时,换流站功率与电压关系如图 4 所示。

下面以控制逆变侧的有功功率与无功功率为例,结合图 2 建立数学模型。由此可得 $d-q$ 坐标系下的电压方程:

$$U_{gd} = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d + U_{rd} - \omega Li_q \quad (1)$$

$$U_{gq} = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + U_{rq} - \omega L i_d \quad (2)$$

式中: U_{gd} 、 U_{gq} 、 U_{rd} 、 U_{rq} 分别为交流网侧和逆变器换流桥侧三相电压基波的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为三相电流基波的 d 、 q 轴分量; ω 为同步频率。

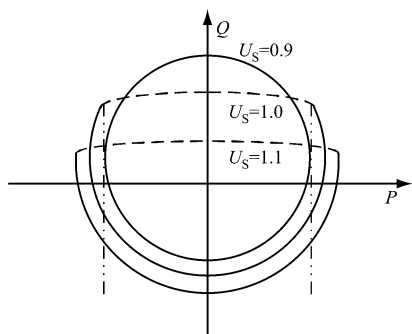


图 4 换流站功率与电压关系曲线

i_d 、 i_q 不仅受到 U_{rd} 、 U_{rq} 的控制,而且两相电流之间还相互耦合。为了实现解耦合,可以使用引入 d - q 轴电压耦合补偿项的方法。控制中有功功率与无功功率外环、电流内环均采用 PI 调节器,则可得

$$U_d = (i_d - i_{dref}) \left(K_1 + \frac{K_2}{s} \right) + \omega L i_q + U_{rd} \quad (3)$$

$$U_q = (i_q - i_{qref}) \left(K_1 + \frac{K_2}{s} \right) - \omega L i_d + U_{rq} \quad (4)$$

式中: K_1 、 K_2 为电流环的比例积分参数; $\frac{1}{s}$ 为积分环节; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为 i_d 、 i_q 的电流给定值。

进一步得到

$$L \frac{di_q}{dt} = \left(K_1 + \frac{K_2}{s} \right) i_{qref} - \left(K_1 + \frac{K_2}{s} + R \right) i_q \quad (5)$$

$$L \frac{di_d}{dt} = \left(K_1 + \frac{K_2}{s} \right) i_{dref} - \left(K_1 + \frac{K_2}{s} + R \right) i_d \quad (6)$$

从式(5)、式(6)可看出, d - q 轴的电流分量已经不再耦合。而且通过采用电流反馈和网侧电压前馈来控制电流内环,不仅可以通过 PI 调节器消除电流跟踪的稳态误差,还提高了电流控制器的跟踪响应特性。电流内环控制如图 5 所示。

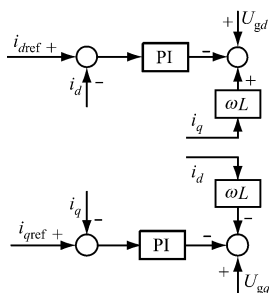


图 5 电流内环控制

由于逆变侧控制的是有功功率与无功功率,当交流电压稳定时,电流与功率之间存在线性关系。

当逆变侧有功功率和无功功率给定值分别为 P_{ref} 、 Q_{2_ref} 时,通过 PI 调节器,则

$$i_{dref} = \left(K_{P1} + \frac{K_{P2}}{s} \right) (P_{ref} - P) \quad (7)$$

$$i_{qref} = \left(K_{Q1} + \frac{K_{Q2}}{s} \right) (Q_{2_ref} - Q_2) \quad (8)$$

式中: K_{P1} 、 K_{P2} 、 K_{Q1} 、 K_{Q2} 为比例积分参数; P 、 Q_2 分别为逆变侧有功功率与无功功率实际值。

DiGSILENT/PowerFactory 软件下的逆变器有功功率、无功功率外环控制分别如图 6、图 7 所示。采用电流前馈解耦控制,通过控制电流的相位与幅值,进一步控制有功功率与无功功率。

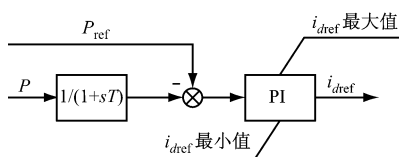


图 6 逆变器有功功率外环控制

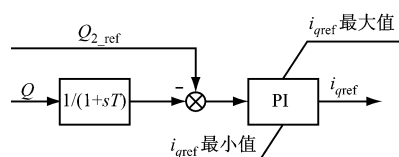


图 7 逆变器无功功率外环控制

为了保证 HVDC-Light 系统稳定工作,另一侧的 VSC 则要起到整流器的作用,控制直流电压与无功功率。因为有功功率与有功电流成正比,所以对于整流侧来说,控制其直流电压也就控制了有功电流^[11]。而直流电压与有功电流呈非线性关系,同样的,采用 PI 调节器,则

$$i_{dref} = \left(K_{V1} + \frac{K_{V2}}{s} \right) (U_{dc_ref} - U_{dc}) \quad (9)$$

$$i_{qref} = \left(K_{Q1} + \frac{K_{Q2}}{s} \right) (Q_{1_ref} - Q_1) \quad (10)$$

式中: K_{V1} 、 K_{V2} 为比例积分参数; U_{dc_ref} 、 Q_{1_ref} 分别为直流电压和整流侧无功功率给定值; Q_1 为整流侧无功功率实际值。

DiGSILENT/PowerFactory 的软件平台上提供了 PWM 的内环电流控制模型,只需调节自带模型的参数即可。逆变器控制模块结构如图 8 所示。

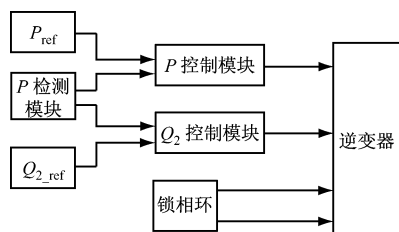
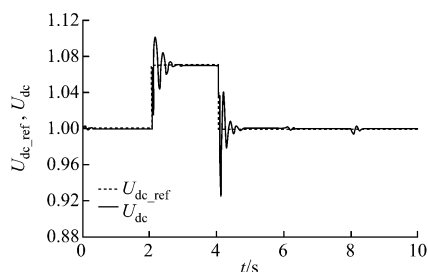


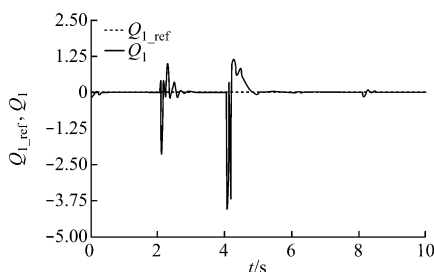
图 8 逆变器控制模块结构

4 仿真分析

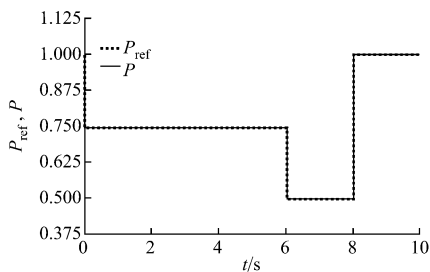
为了验证基于 DIgSILENT/PowerFactory 的 HVDC-Light 系统的正确性及控制系统的有效性,建立系统仿真模型。模型参数:换流站两端交流电压等级为 33 kV(50 Hz);电抗器电感 $L=4.2\text{ mH}$,等效损耗电阻忽略不计;直流侧电容 $C=3\text{ mF}$;直流线路长度为 20 km,电阻值为 $38\text{ m}\Omega/\text{km}$,直流侧电压设定值为 80 kV;VSC 均采用 SPWM 控制,开关频率选择为 1 000 Hz。在仿真过程中,采用直流电压和无功功率控制整流侧 VSC,采用有功功率和无功功率控制逆变侧 VSC。



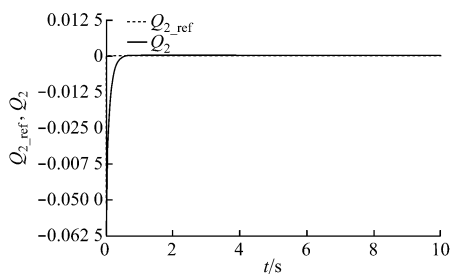
(a) 整流侧直流电压输出波形



(b) 整流侧无功功率输出波形



(c) 逆变侧有功功率输出波形



(d) 逆变侧无功功率输出波形

图 9 方式 1 仿真结果

(2) 方式 2:仿真时间为 10 s,初始给定条件同方式 1。在 2 s 时,整流侧无功功率给定由 0 变为 40 MW;4 s 时,恢复到 0;6 s 时,逆变侧无功功率由 0 变为 -40 MW;8 s 时,恢复到 0。仿真结果如图 10 所示。由图 10 可知,HVDC-Light 系统可以独立地调节整流侧或逆变侧的无功功率,起到静态无功补偿的作用。

(3) 方式 3:仿真时间为 10 s,初始给定条件同方式 1。在 2 s 时,有功功率给定由 120 MW 变为 -80 MW;4 s 时,再反转到 40 MW;6 s 时,变为 -20 MW;8 s 时,再恢复到 120 MW。仿真结果如图 11 所示。由图 11 可知,HVDC-Light 系统具有很好的鲁棒性,在潮流连续反转时依然可以稳定运行。

仿真过程采用如下 3 种方式,仿真结果图示中的纵坐标均为标么值。

(1) 方式 1:仿真时间为 10 s。初始给定条件:初始直流电压给定为 80 kV,有功功率为 120 MW,两侧无功功率都为 0。在 2 s 时,直流电压给定由 80 kV 增加到 86 kV;4 s 时恢复到 80 kV;在 6 s 时,有功功率给定由 120 MW 减少到 80 MW;8 s 时,恢复到 160 MW,两侧换流站无功功率给定均为 0。仿真结果如图 9 所示。由图 9 可知,HVDC-Light 系统能快速跟踪直流电压和有功功率的变化,而且能够在功率波动时运行,具有很好的动态响应能力。

5 结语

介绍了 HVDC-Light 系统的结构特点,讨论了新能源发电场的并网方法。通过使用 DIgSILENT/PowerFactory 软件平台搭建了 HVDC-Light 系统模型。DIgSILENT/PowerFactory 软件自带的数据库和独特的仿真语言,在一定程度上使得电力系统的建模与仿真更加方便快捷。通过仿真结果可以看出,HVDC-Light 系统能够承担起电网之间电力传输的工作,两侧 VSC 可以独立控制无功功率达到静态无功补偿的目的,不需要再额外架设无功补偿装置,简化了系统结构,减少了成本。其快速的电流响应特性能够直观地反映出输电系统的控制情况,而且能实现潮流反转控制,使电网之间的电力传输更加灵活以应对不同的电能需求。

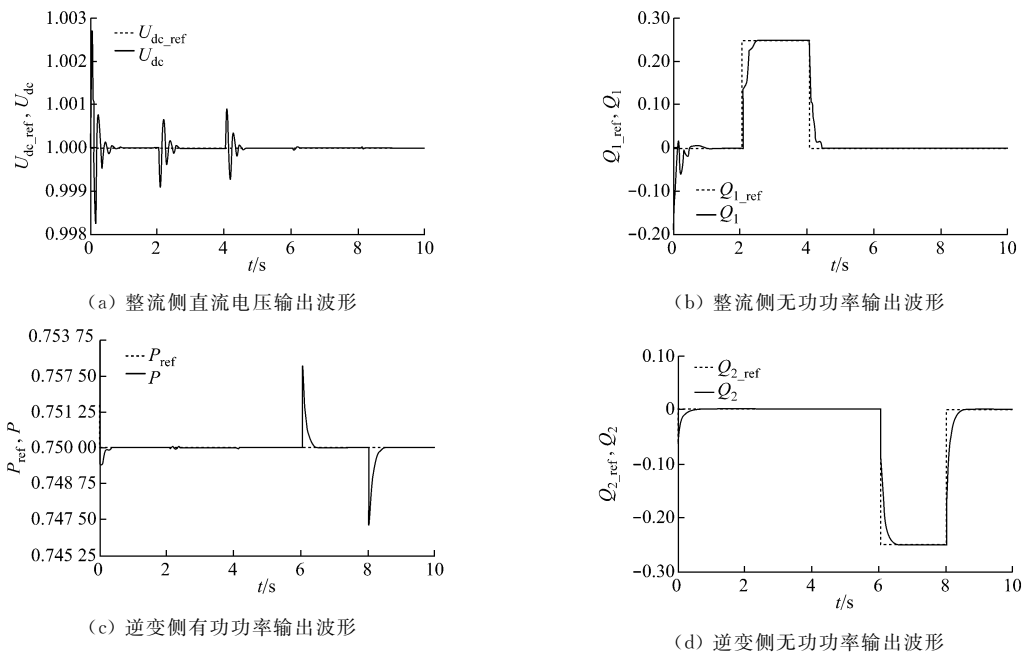


图 10 方式 2 仿真结果

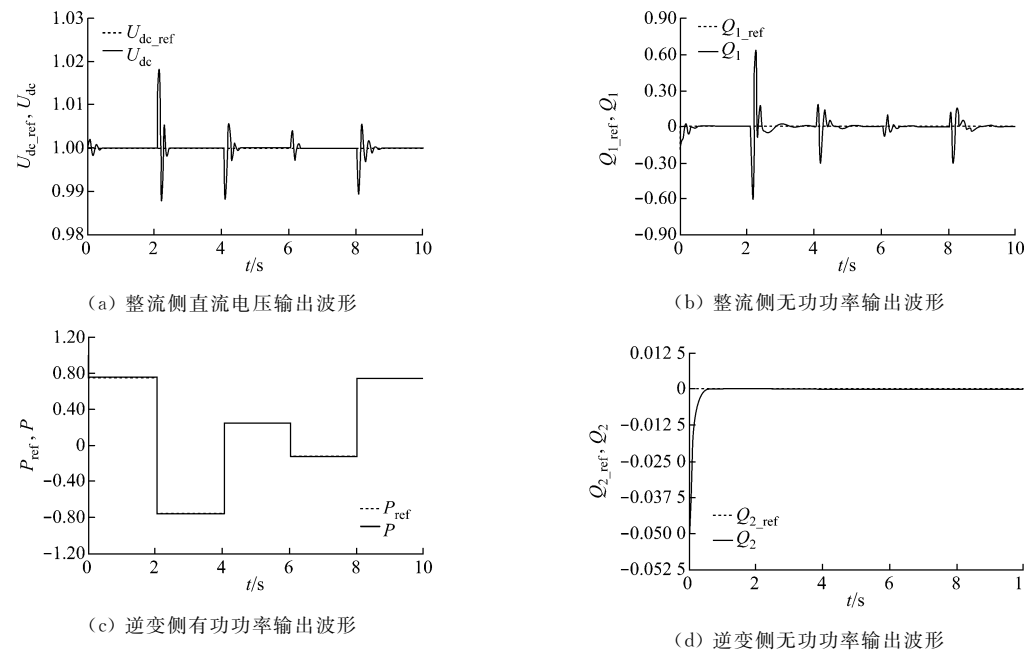


图 11 方式 3 仿真结果

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术 [M]. 北京:中国电力出版社,2010.

[4] 刘波,丁明,吴红斌. 轻型高压直流输电系统的 MATLAB 仿真[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2005,28(6):624-627.

[5] 张凯,李庚银,梁海峰,等. 基于电压源换流器 HVDC 系统稳态控制及仿真[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(3):79-82.

[6] 魏晓光,汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电系统离散化建模与仿真研究[J]. 电网技术, 2006, 30(20):34-39.

[7] 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.

[8] 李国杰,阮思烨. 应用于并网风电场的有源型电压源直流输电系统控制策略[J]. 电网技术,2009,33(1): 52-55.

[9] RETZMANN D,UECKER K. Benefits of HVDC & FACTS for sustainability and security of power supply[C]//Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa,2007.

[10] 严干贵,陈涛,穆钢,等. 轻型高压直流输电系统的动态建模及非线性解耦控制[J]. 电网技术,2007, 31(6):45-50.

[11] 万家晶,肖锐. 轻型高压直流输电系统的研究[J]. 吉林电力,2010,38(5):26-29.