

VSC-HVDC 连续时间状态空间模型 及其控制策略研究

尹明¹, 李庚银¹, 牛同义², 李广凯¹, 梁海峰¹, 周明¹

(1. 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 河北省保定市 071003;
2. 河北电力职工大学, 河北省保定市 071051)

CONTINUOUS-TIME STATE-SPACE MODEL OF VSC-HVDC AND ITS CONTROL STRATEGY

YIN Ming¹, LI Geng-yin¹, NIU Tong-yi², LI Guang-kai¹, LIANG Hai-feng¹, ZHOU Ming¹

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China;
2. Hebei Electrical Workers College, Baoding 071051, Hebei Province, China)

ABSTRACT: The paper presents an equivalent continuous-time state-space model of VSC-HVDC in the synchronous dq reference frame. The d - and q -axis of voltage source converter (VSC) model are decoupled using the feed forward compensation method. Therefore, independent control of active and reactive power, DC voltage and reactive power is achieved. Cascade control scheme to be applied to develop power and voltage control. Based on the model, control strategies for VSC-HVDC have been proposed respectively for the cases of connecting active systems and supplying passive systems. The concept of space vector is utilized for the case of supplying passive systems. The simulation results performed on PSCAD/EMTDC verify the validity of the mathematical model and the feasibility of the control strategies effectively.

KEY WORDS: Power system; HVDC; Voltage source converter(VSC); SPWM; Power control; Voltage control

摘要: 在 dq 同步旋转坐标系下, 推导出 VSC-HVDC 的连续时间状态空间模型, 电压源型换流器(VSC)的双轴模型通过前向补偿方法得到解耦, 从而实现了有功与无功、直流电压与无功的独立控制。在功率和电压控制中采用了级联控制方法。根据所得到的模型, 分别提出了 VSC-HVDC 用于联结 2 个有源系统和向无源系统供电的控制策略。在无源系统控制中, 采用了空间矢量的概念。基于电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 的数字仿真结果验证了数学模型的正确性及控制策略的有效性。

关键词: 电力系统; 高压直流输电; 电压源型换流器; 正弦脉宽调制; 功率控制; 电压控制

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20010079001)。

1 引言

基于电压源换流器(VSC)的高压直流输电(VSC-HVDC)是近年发展起来的一种新型直流输电技术, 其核心是利用由全控型电力电子器件构成并基于脉宽调制(PWM)技术控制的 VSC 代替了常规 HVDC 中的可控硅换流器。

近年来, VSC-HVDC 在国外得到了一些成功的应用, 并日益受到重视^[1-2]。国内外学者在 VSC-HVDC 的运行和控制等方面进行了卓有成效的研究^[3-6]。文[3]提出了 VSC-HVDC 的稳态模型, 并提出了基于逆模型和 PI 控制相结合的非线性控制器, 但该模型给出的相关物理量间的关系比较复杂, 且控制器参数不易确定。文[4]虽提出了对直流电压的非线性控制策略, 但对于功率控制并没有进行深入的讨论。文[5-6]虽然均涉及 VSC-HVDC 的数学模型及控制原理, 但并没有区分将 VSC-HVDC 用于联结有源系统和向无源系统供电时, 功率和电压控制策略的不同。其中, 文[4]对 VSC-HVDC 系统均采用了基于 dq 同步旋转坐标系的数学模型, 在实现功率解耦和对正弦脉宽调制(SPWM)控制等方面显示出较强的优势。本文据此在 dq 同步旋转坐标系下导出了 VSC-HVDC 的连续时间状态空间数学模型, 进而提出了将 VSC-HVDC 用于联结 2 个有源系统和向无源系统供电时的功率和电压控制策略。并针对向有源系统输电设计了有功功率控

制器和直流电压控制器; 针对向无源系统供电设计了整流侧和逆变侧的直流电压和交流电压控制器。其中, 直流电压控制器采用多输入多输出模型, 利用前馈补偿来消除换流器模型中 d 轴和 q 轴之间的耦合, 实现了对有功功率和无功功率、直流电压和无功功率的独立控制。在分析向无源系统供电的情况时, 交流电压控制器的设计利用了空间矢量的概念。仿真结果验证了控制器设计原理的正确性、控制器对各种命令响应的快速性、以及调节的精确性。

2 VSC-HVDC 的数学模型

VSC-HVDC 基本结构如图 1 所示。图中 T_1 和 T_2 表示换流变压器; 相量 V_{s1} 和 V_{s2} 分别为 VSC-HVDC 所联结的 2 个交流系统的母线电压基波相量; V_{c1} 和 V_{c2} 分别为换流器 VSC1 和 VSC2 的输出电压基波相量。假设图 1 中的换流器 VSC1 工作在整流状态, 换流器 VSC2 工作在逆变状态。在整流侧, 交流电压和交流电流通过 Park 变换转化为以 dq 同步坐标系表示, 则其电压平衡关系^[7]为

$$\frac{dI_1^d}{dt} = -\frac{R_1}{L_1} I_1^d + wI_1^q + \frac{V_{s1}^d - V_{c1}^d}{L_1} \quad (1)$$

$$\frac{dI_1^q}{dt} = -\frac{R_1}{L_1} I_1^q - wI_1^d + \frac{V_{s1}^q - V_{c1}^q}{L_1} \quad (2)$$

式中 V_{s1}^d 、 V_{s1}^q 、 I_1^d 、 I_1^q 分别为交流母线基波电压和交流系统基波电流的 d 轴和 q 轴分量; V_{c1}^d 、 V_{c1}^q 分别为换流器输出基波电压的 d 轴和 q 轴分量; R_1 、 L_1 分别为换流电抗器的等效电阻和电感; w 为系统的角频率; 下标 1 代表整流侧。

以整流器侧为例, V_{c1}^d 和 V_{c1}^q 与直流电压 V_{dc1} 间的关系^[8]为

$$V_{c1}^d = (M_1/2)V_{dc1} \cos d_1 \quad (3)$$

$$V_{c1}^q = (M_1/2)V_{dc1} \sin d_1 \quad (4)$$

整流器从交流系统吸收的功率可表示为

$$P_1 = 3/2(V_{s1}^d I_1^d + V_{s1}^q I_1^q) \quad (5)$$

$$Q_1 = 3/2(V_{s1}^d I_1^q - V_{s1}^q I_1^d) \quad (6)$$

忽略换流器和变压器损耗时, 换流器从交流系统吸收的有功功率与换流器输出的直流功率相等, 即

$$P_1 = P_{dc1} = I_{dc1} V_{dc1} \quad (7)$$

式中 I_{dc1} 为整流器直流侧电流。

在换流器直流侧, 存在如下电流平衡关系:

$$I_{dc1} = C_1(dV_{dc1}/dt) + I_{cc} \quad (8)$$

式中 I_{cc} 为直流输电线路上的电流。

综合式(5)和(7)并代入式(8)得到

$$\frac{dV_{dc1}}{dt} = \frac{3V_{s1}^q I_1^q}{2C_1 V_{dc1}} + \frac{3V_{s1}^d I_1^d}{2C_1 V_{dc1}} - \frac{I_{cc}}{C_1} \quad (9)$$

这样, 式(1)、(2)和式(9)就构成了在 dq 同步旋转坐标系下整流器的数学模型。

同理, 可以得到逆变器的数学模型为

$$\frac{dI_2^d}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} I_2^d + wI_2^q + \frac{V_{c2}^d - V_{s2}^d}{L_2} \quad (10)$$

$$\frac{dI_2^q}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} I_2^q - wI_2^d + \frac{V_{c2}^q - V_{s2}^q}{L_2} \quad (11)$$

$$\frac{dV_{dc2}}{dt} = -\frac{3V_{s2}^q I_2^q}{2C_2 V_{dc2}} - \frac{3V_{s2}^d I_2^d}{2C_2 V_{dc2}} + \frac{I_{cc}}{C_2} \quad (12)$$

式中 下标 2 代表逆变侧。

在 VSC-HVDC 中直流线路的数学模型仍可按照传统的 T 型或 π 型等值电路给出。这样, 整流器、逆变器和直流线路的模型共同构成了 VSC-HVDC 在 dq 坐标系下的连续时间状态空间模型。

3 联结有源系统时的控制策略

3.1 概述

当 VSC-HVDC 联结 2 个有源系统时, 一侧的换流器要作为电压控制器维持直流电压的稳定; 另一侧的换流器作为功率控制器调节 2 个有源系统之间功率的传送^[9]。设图 1 中的 VSC1 为功率控制器, VSC2 为电压控制器, 下面给出其控制原理。

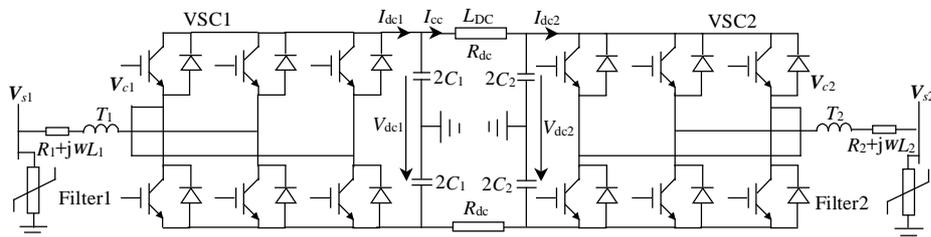


图 1 VSC-HVDC 基本结构图
Fig. 1 Basic structure of VSC-HVDC

3.2 功率控制器控制原理

(1) 电流参考值。 dq 坐标系的规定为: 所联接的交流系统母线电压的基波相量 V_{s1} 与 q 轴同相位, 即 $V_{s1}^q = V_{s1}, V_{s1}^d = 0$ 。这样, 式(5)、(6)可简化为

$$P_1 = 3/2 V_{s1}^q I_1^q = 3/2 V_{s1} I_1^q \quad (13)$$

$$Q_1 = 3/2 (-V_{s1}^q I_1^d) = -3/2 V_{s1} I_1^d \quad (14)$$

在功率控制器中, 交流系统和直流系统间交换的实际有功功率可由交流系统的电压和电流值确定为

$$\bar{P}_1 = V_{s1}^a I_1^a + V_{s1}^b I_1^b + V_{s1}^c I_1^c \quad (15)$$

对于对称三相系统而言, 式(13)与式(15)的计算结果是相等的^[10]。

设 P_{1ref} 表示有功功率设定值。则 q 轴电流参考值可由有功功率偏差 $(P_{1ref} - P_1)$ 通过一个不完全微分 PID 控制产生。而 d 轴电流参考值由无功参考值 Q_{1ref} 给定。在有功控制回路增加不完全微分环节 $D(s)$ 即直接加有低通滤波器的微分环节时有

$$D(s) = GsT / (1 + sT) \quad (16)$$

式(16)的作用既可提高控制器对功率指令变化的响应速度, 又可降低由引入微分造成的高频干扰。

(2) 功率控制器结构。图2给出了有功控制的原理结构图。有功功率和无功功率的控制分别通过对交流电流的 q 轴分量和 d 轴分量进行控制得以实现。控制过程中所用到的交流电压和交流电流均由 abc 三相通过 Park 变换转化为 dq 同步坐标系的量。

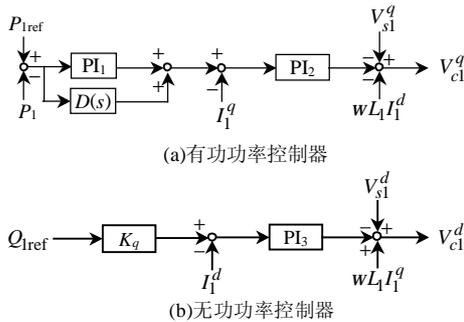


图2 功率控制原理图

Fig. 2 Principle diagram of power control

由式(14)可知, 图2中的 $K_q = -2/(3V_{s1})$; P_1 的值可由式(15)计算得出; wL_1 为换流变压器的电抗值。根据 dq 轴的选取方法, 式(1)、(2)可写成

$$dI_1^d / dt = -R_1 I_1^d / L_1 + w I_1^q - V_{cl}^d / L_1 \quad (17)$$

$$dI_1^q / dt = -R_1 I_1^q / L_1 - w I_1^d + (V_{s1} - V_{cl}^q) / L_1 \quad (18)$$

为了实现对 d 轴和 q 轴的解耦, 本文采用前向解耦技术^[11]来补偿式(17)、(18)中的耦合项 wI_1^d 和 wI_1^q 。交流系统电压的 d 轴和 q 轴分量 (V_{s1}^d, V_{s1}^q) 可

作为2个常干扰项, 并由PI控制器的积分部分给与补偿。定义2个新的输入量 V^d 和 V^q 为

$$V^d = wL_1 I_1^q - V_{cl}^d \quad (19)$$

$$V^q = -wL_1 I_1^d + V_{s1} - V_{cl}^q \quad (20)$$

故在 d 轴和 q 轴方向可得2个独立的一阶模型^[12]:

$$V^d = (sL_1 + R_1) I_1^d \quad (21)$$

$$V^q = (sL_1 + R_1) I_1^q \quad (22)$$

式中 s 为 Laplace 算子。

根据所得到的模型, 在 d 轴和 q 轴方向上即可得到2个独立的电流控制回路。它们是参数相同的PI控制器, 即 PI_2 和 PI_3 。由图2可知, 这2个电流控制回路的第1部分是与相应的交流电流形成反馈控制, 第2部分是前馈补偿掉电压平衡方程式中的耦合项。 PI_2 和 PI_3 的输出增加了限幅环节, 用来产生式(21)和(22)定义的控制信号 V^d 和 V^q 。求和环节的作用是通过得到的控制信号, 根据式(19)、(20)来计算 V_{cl}^d 和 V_{cl}^q 。然后根据式(3)和(4), 即可解出整流器的2个控制参数 M_1 和 d_1 。

3.3 电压控制器控制原理

当忽略谐波分量时, 换流器的输出电压基波分量 $v_{ci}(t)$ 与直流电压 V_{dc} 之间的关系为^[13]

$$v_{ci}(t) = (M_i / 2) V_{dc} \sin(\omega t + d_i), \quad (i=1, 2) \quad (23)$$

式中 d_i 为 SPWM 的正弦调制波的相角。

改变 d_i 就可以改变 V_{ci} 与 V_{si} 的相位关系, 从而改变有功功率的大小和方向。

图1中 VSC2 侧的电压控制器将直流电压 V_{dc2} 和该侧交流系统的母线电压 V_{s2} 作为控制目标。由式(23)可知, V_{s2} 与 SPWM 的调制比 M_2 近似呈线性关系。所以可利用简单的PI控制实现 M_2 对 V_{s2} 的控制。此外, 通过调节 SPWM 的正弦调制波相角 d_2 可以改变换流器两侧的交流功率。这样就可以利用 d_2 控制 V_{dc2} 。电压控制器的原理如图3所示。

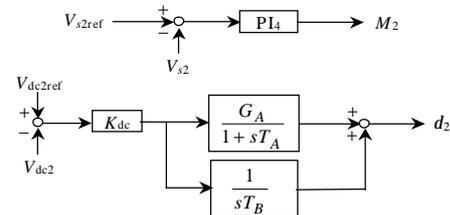


图3 电压控制原理图

Fig. 3 Principle diagram of voltage control

3.4 锁相环 (PLL)

为了保证 dq 旋转系统与 abc 系统同步, 控制回路采用了锁相环^[14]。它根据交流系统的角频率 ω 及

交流系统电压的相位，产生一个同步信号 \mathbf{x} 。该同步信号可确保 dq 旋转系统与 abc 系统的同步^[15]。这样，当 \mathbf{x} 与交流系统电压同步时， dq 坐标系就被锁定，并与 abc 三相保持同步。

4 向无源系统供电时的控制策略

4.1 概述

对于向无源系统供电的 VSC-HVDC，通常联结有源系统的整流侧换流站工作在定直流电压控制模式下，以直流电压作为主要控制目标，以无功功率为辅助控制目标；而联结无源系统的逆变侧换流站工作在定交流电压控制模式下，以保证换流变压器输出电压的有效值恒定。

4.2 整流侧直流电压控制器

该侧的控制原理如图 4 所示。它与图 2 给出的功率控制原理相似，直流电压控制回路仍采用不完全微分 PID 控制，只是将图 2 的有功功率参考值和实际值替换成整流侧直流电压的相应量，并且控制器的参数也要进行相应的调整。

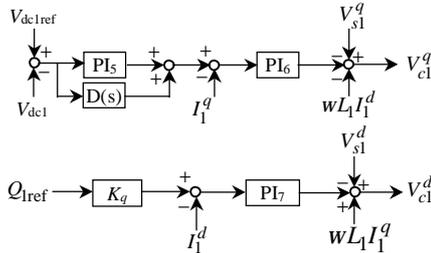


图 4 整流侧直流电压控制原理图
Fig. 4 Rectifier DC voltage control

4.3 逆变侧交流电压控制器

逆变侧的控制目标是保证换流变压器输出电压的有效值恒定。传统的有效值检测方法不利于提高控制的快速性和精确性。为了解决这个问题，文[16]根据空间矢量的概念，提出了由瞬时值计算有效值的方法。本文以三相电压为例，对该方法进行说明。三相电压的空间矢量被定义为

$$\bar{V} = \sqrt{2/3}(v^a + v^b e^{j120^\circ} + v^c e^{-j120^\circ}) \quad (24)$$

式中 v^a 、 v^b 和 v^c 分别为 abc 三相电压的瞬时值。

设换流变压器输出的三相电压分别为

$$\begin{cases} v_{s2}^a = \sqrt{2/3}V_{s2} \cos(\omega t + j) \\ v_{s2}^b = \sqrt{2/3}V_{s2} \cos(\omega t + j - 120^\circ) \\ v_{s2}^c = \sqrt{2/3}V_{s2} \cos(\omega t + j + 120^\circ) \end{cases} \quad (25)$$

式中 V_{s2} 为变压器输出线电压的有效值； v_{s2}^a 、 v_{s2}^b 、

v_{s2}^c 分别为 abc 三相电压的瞬时值。

将式(25)代入式(24)可得

$$\bar{V}_{s2} = V_{s2} e^{j\theta} \quad (26)$$

进而可得电压有效值的计算公式为

$$V_{s2} = \left| \bar{V}_{s2} \right| = \sqrt{2/3} \left| -v_{s2ca} + v_{s2bc} e^{j120^\circ} \right| \quad (27)$$

式中 v_{s2ca} 、 v_{s2bc} 分别为 c 相和 a 相、 b 相和 c 相之间的线电压瞬时值。

由式(23)可知， V_{s2} 与调制系数 M_2 近似呈线性关系，所以，采用 PI 控制可达到较满意的效果。图 5 给出了逆变侧交流电压控制器的原理图。

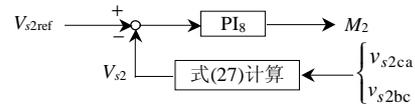


图 5 逆变侧交流电压控制原理图
Fig. 5 Inverter AC voltage control

5 系统仿真与分析

5.1 系统参数

为了验证导出的 VSC-HVDC 的数学模型及其控制策略的正确性和可行性，本文采用 PSCAD/EMTDC 进行了仿真试验。仿真所采用的系统参数为： $f_1=50\text{Hz}$ ， V_{s1} (峰值)=11.26kV， V_{s2} (峰值)=93.90kV， $R_1=0.15\Omega$ ， $R_2=8.45\Omega$ ， $wL_1=0.53\Omega$ ， $wL_2=31.36\Omega$ ， $C_1=C_2=450\mu\text{F}$ ， $R_{dc}=5.36\Omega$ ；整流变压器额定容量为 100MVA，变比为 13.8/62.5kV；逆变变压器额定容量为 100MVA，变比为 62.5/115kV；直流线路全长 100km，直流电压参考值为 70kV；载波信号频率为 2250Hz。

5.2 联结 2 个有源系统时的仿真

整流侧控制器的参数为：对于 PI_1 有，比例系数 $k_1=1.8$ ，积分时间常数 $T_1=0.019$ ，不完全微分环节的 $G=0.85$ ， $T=0.01$ ； PI_2 和 PI_3 有相同的参数，比例系数 $k_2=k_3=0.55$ ，积分时间常数 $T_2=T_3=19$ 。逆变侧交流电压控制器的参数为：比例系数 $k_4=7$ ，积分时间常数 $T_4=0.02$ 。直流电压控制器参数为：比例增益 $K_{dc}=3$ ；一阶惯性环节参数 $G_A=0.6$ ， $T_A=0.018$ ；积分环节参数 $T_B=30$ 。

Case1~Case4 的仿真结果如图 6~10 所示。图 6 和 7 分别对应于 VSC1 侧的有功功率发生由 50~70MW (Case1) 和由 70~50MW (Case2) 的阶跃变化时，该侧交流系统发出的有功功率 P_1 和无功功率 Q_1 的波形。图 8 和 9 分别对应于有功功率发生 50~30MW 的翻转 (无功功率固定为 0Mvar，

Case3) 时, 交流功率与直流线路整流侧和逆变侧的功率波形。图 10 为无功功率由 0~20Mvar (有功功率固定为 70MW, Case4) 变化时, VSC1 侧交流系统发出的有功功率和无功功率的波形。以上 4 项仿真内容的指令动作时间均定在第 0.72s。表 1 列出了各项仿真结果中功率的上升时间 t_{rise} 、峰值时间 t_{peak} 、稳定时间 t_{settle} 、超调量 s 及稳态偏差 Δ (绝对值)。从仿真结果可以获得如下结论:

- (1) VSC- HVDC 控制不需换流站间的通讯;
- (2) 文中的功率控制器对于有功阶跃和翻转指令及无功阶跃指令都具有较理想的稳定性和较快的响应速度, 一般可在 3~10 个周波进入稳态;
- (3) 在不同的运行点, 被控量均可达到较高

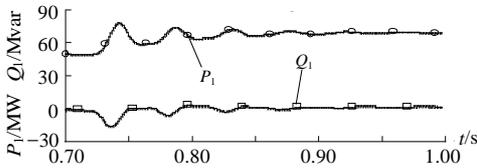


图 6 有功功率由 50~70MW 变化时的波形
Fig. 6 AC power in Case 1

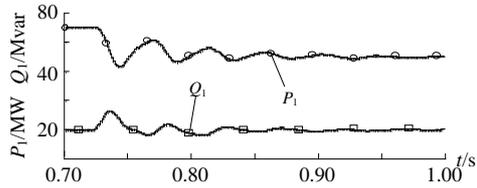


图 7 有功功率由 70~50MW 变化时的波形
Fig. 7 AC power in Case 2

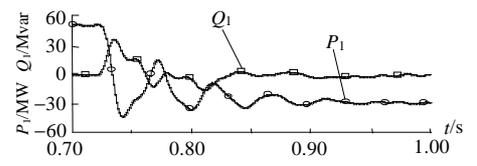


图 8 有功功率由 50~30MW 变化时的波形
Fig. 8 AC power in Case 3

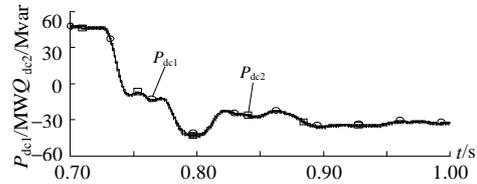


图 9 有功功率由 50~30MW 变化时的直流功率波形
Fig. 9 DC power in Case 3

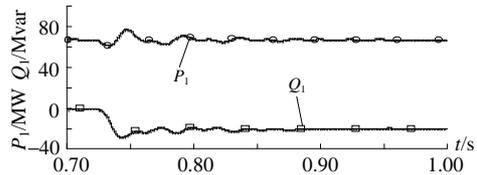


图 10 无功功率由 0~20Mvar 变化时的波形
Fig. 10 AC power in Case 4

表 1 仿真结果主要指标

Tab. 1 Main indexes of simulation results

指标	Case1	Case2	Case3	Case4
t_{rise}/s	0.016	0.015	0.017	0.017
t_{peak}/s	0.022	0.022	0.021	0.024
t_{settle}/s	0.076	0.106	0.206	0.116
$s/\%$	11.79	15.78	42.65	42.20
$\Delta/\%$	0.13	0.23	0.33	0.52

的精度;

- (4) 本文提出的有功功率控制器可快速地完成潮流翻转, 在翻转过程中, 直流线路上的有功传输方向没有发生第 2 次翻转。

5.3 向无源系统供电时的仿真

整流侧控制器参数为: 对于 PI_5 有, $k_5=1.32$, $T_5=0.0265$; 不完全微分环节 $G=0.141$, $T=0.01$; PI_6 和 PI_7 有相同的参数, $k_6=k_7=0.105$, $T_6=T_7=9.847$ 。逆变侧交流电压控制器的参数为: $k_8=1.25$, $T_8=0.01$ 。图 11~16 给出了 Case5~Case6 的仿真结果, 整流侧

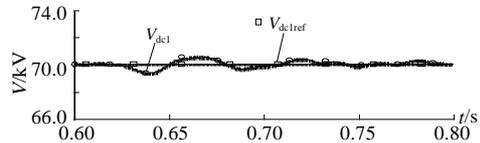


图 11 负荷增加时整流侧直流电压波形
Fig. 11 Rectifier DC voltage in Case 5

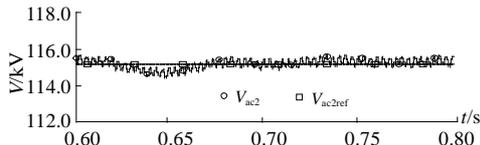


图 12 负荷增加时逆变侧交流电压波形
Fig. 12 Inverter AC voltage in Case 5

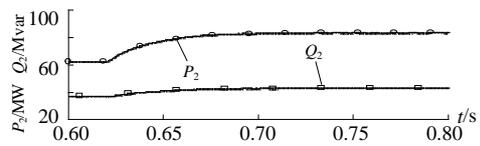


图 13 负荷增加时逆变侧功率的变化
Fig. 13 Inverter AC power in Case 5

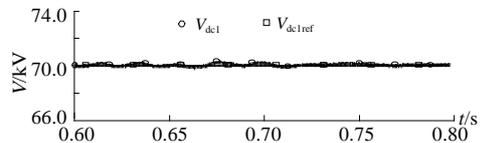


图 14 电压升高时整流侧直流电压波形
Fig. 14 Rectifier DC voltage in Case 6

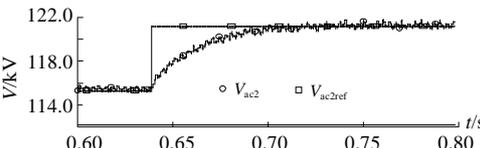


图 15 电压升高时逆变侧交流电压波形
Fig. 15 Inverter AC voltage in Case 6

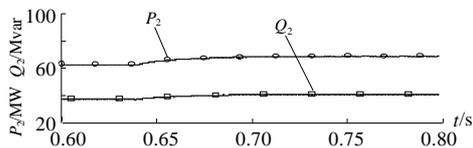


图 16 电压升高时逆变侧功率变化
Fig. 16 Inverter AC power in Case 6

直流电压参考值 V_{dc1ref} 为 70kV。其中, 图 11~13 分别对应于在 0.62s 时刻, 无源系统负荷由 65+j38MVA 阶跃到 87+j45MVA 时 (Case 5), 整流侧直流电压 V_{dc1} 、逆变侧换流变压器输出电压 V_{ac2} ($V_{ac2ref}=115kV$ 是 V_{ac2} 的参考值)、有功功率 P_2 和无功功率 Q_2 的变化情况。图 14~16 分别对应于在 0.64s 时刻, 逆变侧交流电压参考值 V_{ac2ref} 由 1pu 阶跃到 1.05pu 时 (Case 6) 的情况。

由仿真结果知, 在交流电压控制器的作用下, 逆变侧换流变压器输出电压能快速、精确地进行调节, 对于负荷变化较大的无源系统仍能提供良好的电压支持。且在调节过程中, 整流器侧的直流电压控制器也能很好地维持直流线路的电压恒定。

6 结论

本文推导了 dq 坐标系下 VSC-HVDC 的连续时间状态空间模型。根据所得到的模型, 针对向有源系统和无源系统供电的 2 种情况, 提出了 d 轴和 q 轴解耦控制策略, 并设计了带有不完全微分 PID 算法的功率控制器和电压控制器。在控制过程中, 模型的 d 轴和 q 轴之间的耦合可通过前向补偿技术予以消除, 从而实现功率的解耦控制。同时, 这种控制器的结构有利于提高控制器的响应速度。以 PSCAD/EMTDC 软件仿真的结果验证了数学模型的正确性以及控制策略的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-80.
Li Gengyin, Lü Pengfei, Li Guangkai *et al.* The new development and review for HVDC light[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 77-80.
- [2] 文俊, 张一工, 韩晓民, 等. 轻型直流输电——一种新一代 HVDC 技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-51.
Wen Jun, Zhang Yigong, Han Xiaomin *et al.* HVDC based on voltage source converter—a new generation of HVDC technique[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 47-51.
- [3] 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 Guibin, Xu Zheng, Wang Guangzhu. Steady-state model for VSC based HVDC and its controller design[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 17-22.
- [4] Thomas J L, Poulain S, Benchaib A. Analysis of a robust DC-bus voltage control system for a VSC transmission scheme[C]. In: Seventh International Conference on AC and DC Power Transmission (IEE Conference Publication No. 485), London, U.K., 2001. 119-124.
- [5] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 一种优化控制策略在基于电压源换流器的 HVDC 系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 38-41.
Hu Zhaoqing, Mao Chengxiong, Lu Jiming. Application of an optimal control strategy to a new type of HVDC system based on voltage source converters[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 38-41.
- [6] Zhang Guibin, Xu Zheng, Shao Wei. Research on the control and simulation of HVDC-VSC[C]. In: Proc of International Conference on Power System, Wuhan(China), 2001. 371-375.
- [7] Papic I. Mathematical analysis of FACTS devices based on a voltage source converter: Part 1: mathematical models[J]. Electric Power Systems Research, 2000, 56(2): 139-148.
- [8] Dinavahi V R, Iravani M R, Bonet R. Real-time digital simulation of power electronic apparatus interfaced with digital controllers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 775-781.
- [9] Ooi B T, Wang X. Voltage angle lock loop control of the boost type PWM converter for HVDC application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1990, 5(2): 229-235.
- [10] 殷波, 陈允平. abc 坐标系下广义无功电流和功率的定义及补偿 [J]. 电网技术, 2003, 27(7): 43-47.
Yin Bo, Chen Yunping. Definition and compensation of generalized instantaneous reactive current and reactive power in abc coordinates [J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 43-47.
- [11] 周志刚. 一种感应电机的解耦控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 121-125.
Zhou Zhigang. An induction motor de-couple control method [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 121-125.
- [12] Sao C K, Lehn P W, Iravani M R *et al.* A benchmark system for digital time-domain simulation of a pulse-width-modulated D-STATCOM [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(4): 1113-1120.
- [13] Anderson B R, Xu L, Horton P J *et al.* Topologies for VSC transmission[J]. Power Engineering Journal, June, 2002: 142-150.
- [14] 庞浩, 俎云霄, 王赞基. 一种新型的全数字锁相环[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 37-42.
Pang Hao, Zu Yunxiao, Wang Zanji. A New Design of All Digital Phase-locked Loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 37-42.
- [15] Chung S K. Phase-locked loop for grid-connected three-phase power conversion systems[J]. IEE Proc. —Electr. Power Appl., 2000, 147(3): 213-219.
- [16] 王冠, 蔡晔, 张桂斌, 等. 高压直流输电电压源换流器的等效模型及混合仿真技术[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 4-8.
Wang Guan, Cai Ye, Zhang Guibin *et al.* Equivalent model of VSC-HVDC and its hybrid simulation technique[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 4-8.

收稿日期: 2005-05-08.

作者简介:

尹 明(1974-), 男, 博士研究生, 研究方向为新型输配电技术, FACTS 技术等;

李庚银(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能质量、电力市场、新型输配电技术等;

牛同义(1961-), 男, 大学毕业, 高级工程师, 研究领域包括电力系统自动装置, 电力电子技术等。