

# 风电接入下柔性直流输电的无源解耦控制

范心明<sup>1</sup> 管霖<sup>1</sup> 何健明<sup>1</sup> 夏成军<sup>1</sup> 饶宏<sup>2</sup> 李立涅<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学电力学院 广州 510641 2. 南方电网科学研究院 广州 510080)

**摘要** 对于风电场的接入柔性直流输电具有明显的技术经济优势,而大规模风电的集中接入需要更强的鲁棒性。基于换流器三相坐标系下的数学模型,建立了换流器在 d-q 旋转坐标系下的 EL (Euler-Lagrange) 数学模型,证明了换流器的严格无源性。基于换流器的能量耗散性,采用状态误差构造能量存储函数并以误差存储函数为 Lyapunov 函数,通过注入阻尼使系统快速收敛到期望稳定平衡点。根据误差存储函数的收敛条件设计了换流器的无源控制器,实现了各变量的解耦控制。在不同的运行条件下,用 PSCAD/EMTDC 软件对控制系统进行了仿真,结果表明所提出的控制策略具有良好的动、静态性能和鲁棒性。

**关键词**: 大规模风电 柔性直流输电 无源性 EL 模型 误差存储函数 解耦控制

**中图分类号**: TM721.1/ TM 614

## Decoupling Passivity Control of VSC-HVDC Connected Wind Power

Fan Xinming<sup>1</sup> Guan Lin<sup>1</sup> He Jianming<sup>1</sup> Xia Chengjun<sup>1</sup> Rao Hong<sup>2</sup> Li Licheng<sup>1,2</sup>

(1. South China University of Technology Guangzhou 510641 China

2. Electric Power Research Institute China Southern Power Grid Guangzhou 510080 China)

**Abstract** For wind farm connection VSC-HVDC transmission has obvious techno-economic advantages, but concentrated integration of large scale wind power demands stronger robustness. Based on the mathematical model of VSC-HVDC in three phase frame, the Euler-Lagrange model of voltage-source-converter (VSC) in rotating d-q frame is built and the strict passivity of VSC is proved. Based on the energy dissipativity of VSC, energy storage function is set up by state error and error storage function is used as Lyapunov function, VSC-HVDC is astringed to desired stable equilibrium point rapidly by damping assigning. The passivity controller is designed according to the astringency condition of error storage function, and decoupling control of each variable is achieved. Under different operating conditions, VSC-HVDC system is simulated by software PSCAD/EMTDC. The results show the proposed control strategy has good dynamic and steady performance and strong robustness.

**Keywords**: Bulk wind power, VSC-HVDC, passivity, EL model, error storage function, decoupling control

## 1 引言

风力发电是各国实行可再生能源发展目标时考虑的重点,至 2010 年底全球风电装机容量达 196 630MW<sup>[1]</sup>。在国家能源战略的推动下,国内风电快速发展,据最新统计,截至 2010 年底,全国风

电装机容量约为 26GW<sup>[2]</sup>,风电输出功率在电网中的比重进一步增加,特别是在华北、东北和西北这 3 个风资源丰富的地区。另一方面,在国家“建设大基地、融入大电网”的风电发展战略指导下,风电场呈现出规模化发展的趋势,单一风电场装机容量由几十兆瓦增长到几百,甚至上千兆瓦。我国风电正在由分散、小规模开发、就地消纳,向大规模、高集中开发和远距离、高电压输送方向快速发展<sup>[3]</sup>。基于电压源换流器(VSC)的柔性直流输电

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A102)。

收稿日期 2012-09-15 改稿日期 2013-05-10

(VSC-HVDC) 可以实现有功功率和无功功率的独立控制, 动态反应快速, 具有很强的输电灵活性并能提高系统的稳定性<sup>[4-7]</sup>。另外, 对百兆瓦以上的风电场, 采用柔性直流输电接入将更为经济<sup>[8]</sup>, 因此, 对于大型风电场的接入, 柔性直流输电具有明显的技术经济优势。VSC-HVDC 可运行在定直流电压控制模式、定有功与无功控制模式和定交流电压控制模式<sup>[9]</sup>, 因此, VSC-HVDC 的交直流电压与功率控制尤为重要, 且其中一个换流器的直流电压控制将保证有功功率平衡和直流电压稳定<sup>[10, 11]</sup>。然而 VSC-HVDC 换流器的 4 个控制输入及它们之间的相互作用使得 VSC-HVDC 成为一个非线性强耦合的多输入多输出控制系统。解决系统变量耦合问题的最常用方法是基于同步旋转坐标系的电压矢量定向双闭环 PID 控制<sup>[12]</sup>。为此, 一些新的控制策略也应用到 VSC-HVDC 控制中, 文献[9]采用反馈线性化与滑模控制实现多输入多输出变量的解耦控制; 文献[13]针对换流器的非线性特性运用自适应反演控制提高 VSC-HVDC 的动态性能; 文献[14]将模糊 PI 控制应用于换流器的内环控制; 文献[15]将神经网络 PID 与滑模变结构控制应用于换流器外环、内环控制当中, 由于 VSC-HVDC 的多变量结构与高度耦合的非线性特征, 总是难于得到理想的控制效果。

无源控制是一种基于系统能量耗散性的新兴非线性控制理论<sup>[16]</sup>, 由于其鲁棒性强、易于硬件实现, 已成功应用于电力电子、电机控制等领域<sup>[17, 18]</sup>。本文基于 VSC-HVDC 的欧拉-拉格朗日 (Euler-Lagrange, EL) 模型, 设计了换流器的无源解耦控制器, 该控制方法使 VSC-HVDC 具有更好的动、静态性能, 使大型风电场柔性直流输电系统具有更强的鲁棒性。在不同运行条件下仿真验证了该控制策略的优越性。

## 2 风电柔性直流输电系统与数学模型

### 2.1 风电机组数学模型

风力机通过叶片捕获风能, 将风能转换为作用在轮毂上的机械转矩, 根据风力机功率特性方程可得

$$P_m = \rho \pi R^2 v^3 \frac{C_p}{2} \quad (1)$$

式中,  $P_m$  为风力机机械功率;  $C_p$  为风能转换效率系数;  $R$  为风轮机叶片半径;  $\rho$  为空气密度;  $v$  为风速。风力机捕获风能转化的机械转矩  $T_m$  为<sup>[19]</sup>

$$T_m = \frac{\rho \pi R^2 v^3 C_p}{2 \omega_r} \quad (2)$$

式中,  $\omega_r$  为风力机角速度。

异步发电机的电磁功率  $P_e$  为

$$P_e = \frac{m_1 p U_N^2 R_2' / s}{2 \pi f_1 [(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2]} \frac{2 \pi f_1}{p} \quad (3)$$

式中,  $m_1$  为电压相数;  $s$  为转差率;  $f_1$  为频率;  $p$  为磁极对数;  $U_N$  为发电机机端电压;  $R_1$ 、 $R_2'$  和  $X_{1\sigma}$ 、 $X_{2\sigma}'$  分别为异步发电机的定、转子的等值电阻和电抗。由于稳态运行时  $s$  很小,  $R_2'/s$  比  $R_1$ 、 $X_{1\sigma}$  和  $X_{2\sigma}'$  大很多, 因此忽略  $R_1$  与  $X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'$ , 可得

$$P_e = \frac{m_1 p U_N^2}{2 \pi f_1 R_2' / s} \frac{2 \pi f_1}{p} = \frac{m_1 U_N^2 s}{R_2'} \quad (4)$$

发电机转轴上的机械转矩  $T_m$  与发电机的电磁转矩  $T_e$  共同作用, 从而调节转子转速。设  $J$  为机组轴系惯性时间常数, 风电机组的轴系采用单质块模型, 则

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e \quad (5)$$

根据平均风速时整个风电场的输出功率, 将 VSC-HVDC 输送功率整定为  $P_N$ , 据式 (4) 可得

$$P_N = P_e = \frac{m_1 U_N^2 s}{R_2'} = \frac{m_1 U_N^2}{R_2'} \left( 1 - \frac{n_r}{n_1} \right) \quad (6)$$

式中,  $n_r$  为风电机组转子转速;  $n_1$  为同步转速。由式 (2) 和式 (5) 可知, 当风速变化时,  $n_r$  将随之变化。而当 VSC-HVDC 换流器交流侧的输出电压控制为  $U_N$  不变时, 由式 (6) 可知, 当  $P_N$  不变时同步转速  $n_1$  将发生相应变化, 也就是换流器交流侧输出电压的频率  $f_1$  将相应发生变化。因此, 可以通过检测风电场频率变化来修正 VSC-HVDC 输送功率  $P_N$ , 实时调整输送功率大小使其与风电场输出功率相一致。

### 2.2 VSC-HVDC 系统结构与数学模型

风电场柔性直流输电系统拓扑结构如图 1 所示, 风电场经换流变压器与送端电压源换流器连接, 受端换流器经换流变压器接入系统, 两端结构相同的

换流器由长距离直流输电线路连接。图 2 为一端换流器具体结构, 图中将公共连结点 (PCC) 与换流器交流侧之间的连接变压器损耗和漏抗统一等效为图示的电阻  $R$  和电抗  $L$  并假设三相主电路参数完全相同,  $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$ 、 $u_{sc}$  为 PCC 处三相对称相电压,  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为三相线电流,  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  为换流器交流侧相电压,  $U_{dc}$  为直流侧电压,  $i_{dc}$  为直流线路中直流电流。

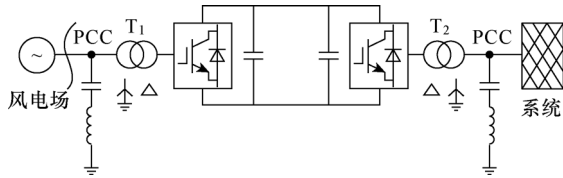


图 1 风电场 VSC-HVDC 接入拓扑

Fig.1 Wind farm VSC-HVDC connection topology

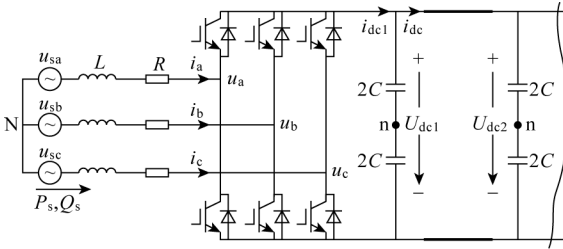


图 2 VSC-HVDC 电路拓扑

Fig.2 VSC-HVDC circuit topology

柔性直流输电换流器 abc 三相静止坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = u_{sa} - u_a - Ri_a = u_{sa} - u_{dc} \left( s_a - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} S_j \right) - Ri_a \\ L \frac{di_b}{dt} = u_{sb} - u_b - Ri_b = u_{sb} - u_{dc} \left( s_b - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} S_j \right) - Ri_b \\ L \frac{di_c}{dt} = u_{sc} - u_c - Ri_c = u_{sc} - u_{dc} \left( s_c - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} S_j \right) - Ri_c \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c - i_{dc} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $S_j(j=a, b, c)$  为控制开关管通断的逻辑开关函数,  $S_j=1$  对应上桥臂导通下桥臂关断,  $S_j=0$  对应上桥臂关断下桥臂开通。由 Park 矢量变换矩阵及其变换逆矩阵将换流器三相静止坐标系下的数学模型 (7) 变换得到 d-q 同步旋转坐标系下的数学模型

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = u_{sd} - u_d - Ri_d - \omega Li_q = u_{sd} - S_d u_{dc} - Ri_d - \omega Li_q \\ L \frac{di_q}{dt} = u_{sq} - u_q - Ri_q + \omega Li_d = u_{sq} - S_q u_{dc} - Ri_q + \omega Li_d \\ \frac{2}{3} C \frac{du_{dc}}{dt} = S_d i_d + S_q i_q - \frac{2}{3} i_{dc} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $S_d$ 、 $S_q$  为开关函数的 d、q 轴分量;  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  为 PCC 处电压的 d、q 轴分量;  $u_d$ 、 $u_q$  为换流器交流侧电压的 d、q 轴分量。在 dq 同步旋转坐标系下的有功功率  $P_s$  和无功功率  $Q_s$  可表示为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (u_{sd} i_d + u_{sq} i_q) \\ Q_s = \frac{3}{2} (u_{sd} i_q - u_{sq} i_d) \end{cases} \quad (9)$$

当 d 轴定位在 PCC 处电压相量时,  $u_{sq}=0$ , 则  $P_s = \frac{3}{2} u_{sd} i_d$ ,  $Q_s = \frac{3}{2} u_{sd} i_q$ , 所以分别控制  $i_d$ 、 $i_q$  可以实现  $P_s$  和  $Q_s$  的解耦控制。

### 3 柔性直流输电换流器的 EL 模型

将式 (8) 变换成

$$\begin{pmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3}C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \frac{du_{dc}}{dt} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3R_{dc}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \omega L & S_d \\ -\omega L & 0 & S_q \\ -S_d & -S_q & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中,  $R_{dc} = u_{dc} / i_{dc}$ , 为直流侧等效电阻。把式 (10) 写成欧拉-拉格朗日方程形式<sup>[17, 20]</sup>

$$M\dot{x} + \mathcal{R}x + Jx = u \quad (11)$$

式中,  $M$  为正定对角阵;  $x$  为状态变量;  $\mathcal{R}$  为对称正定矩阵, 反映了系统的耗散特性;  $J$  为反对称矩阵,  $J = -J^T$ , 反映了状态变量的互联特性;  $u$  为控制输入。根据式 (10), 各矩阵具体表达式为

$$M = \begin{pmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3}C \end{pmatrix}, \mathcal{R} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3R_{dc}} \end{pmatrix},$$

$$J = \begin{pmatrix} 0 & \omega L & S_d \\ -\omega L & 0 & S_q \\ -S_d & -S_q & 0 \end{pmatrix}, x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{pmatrix}, u = \begin{pmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

对于电压源换流器, 设换流器的能量存储函数为  $H = \frac{1}{2}x^T Mx$ , 由式 (11) 可得

$$\dot{H} = x^T M \dot{x} = x^T (u - Jx - \mathcal{R}x) = x^T u - x^T \mathcal{R}x \quad (12)$$

这时令输出  $y=x$ , 能量供给率  $s(u,y)=u^T y$ , 正定函数  $Q(x)=x^T \mathcal{R}x$ , 这时系统的能量存储

$$H = H[x(t)] - H[x(0)] = \int_0^t u^T y d\tau - \int_0^t x^T \mathcal{R}x d\tau \quad (13)$$

或

$$\dot{H} = u^T y - Q(x) \quad (14)$$

因此, 电压源换流器是严格无源的。这种能量函数的衰减特性正是李亚普诺夫 (Lyapunov) 意义下稳定性的体现, 此时的能量函数就是李亚普诺夫函数。

#### 4 换流器的无源控制器设计

柔性直流输电电压源换流器在稳态运行时, 期望直流电压等于给定电压  $u_{dc}^*$ , PCC 与 VSC 间电流的 d、q 轴分量  $i_d$ 、 $i_q$  由实现有功与无功解耦控制的需求确定。因此, 期望稳定平衡点  $x_1^* = x_d^*$ ,  $x_2^* = x_q^*$ ,  $x_3^* = x_{dc}^*$ 。选择系统的误差存储函数为  $H_e = \frac{1}{2}x_e^T Mx_e$ , 令  $x_e = x - x^*$ , 由式 (11) 可得

$$M\dot{x}_e + \mathcal{R}x_e + Jx_e = u - (M\dot{x}^* + \mathcal{R}x^* + Jx^*) \quad (15)$$

为使系统快速收敛到期望平衡点, 需加速系统的能量耗散, 使误差存储函数快速变零, 因此注入一定的阻尼, 设阻尼为

$$\mathcal{R}_d = \mathcal{R} + \mathcal{R}_a \quad (16)$$

式中,  $\mathcal{R}_a$  为正定矩阵, 则式 (15) 变为

$$M\dot{x}_e + \mathcal{R}_d x_e + Jx_e = u - (M\dot{x}^* + \mathcal{R}x^* + Jx^*) + \mathcal{R}_a x_e \quad (17)$$

令

$$u - (M\dot{x}^* + \mathcal{R}x^* + Jx_e + Jx^*) + \mathcal{R}_a x_e = 0 \quad (18)$$

使  $M\dot{x}_e + \mathcal{R}_d x_e = 0$ , 有

$$\dot{H}_e = x_e^T M \dot{x}_e = -x_e^T \mathcal{R}_d x_e < 0 \quad (19)$$

由式 (19) 可知误差存储函数收敛速度快并与  $R_a$  有关。由式 (18) 可得到换流器的无源控制律为

$$\begin{cases} u_d = u_{sd} + R_a i_d - (R + R_a) i_d^* - \omega L i_q \\ u_q = u_{sq} + R_a i_q - (R + R_a) i_q^* + \omega L i_d \end{cases} \quad (20)$$

因此, 由式 (20) 就得到了换流器的交流侧输出电压。将式 (20) 代入式 (8) 可得

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = (R + R_a)(i_d^* - i_d) \\ L \frac{di_q}{dt} = (R + R_a)(i_q^* - i_q) \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{u_{dc}^* - u_{dc}}{R_{dc}} + 3R_a \frac{u_{dc}^* - u_{dc}}{2} \end{cases} \quad (21)$$

从式 (21) 可以看出: 当  $R_a$  较大时,  $i_d$ 、 $i_q$  及  $u_{dc}$  很快稳定于期望稳定平衡点。另外, 式 (21) 表明无源控制律 (20) 可以实现  $i_d$ 、 $i_q$  及  $u_{dc}$  的动态与静态解耦, 提高换流器的动、静态性能。

式 (20) 中  $i_d^*$ 、 $i_q^*$  由外环控制器得到, 为易于有功功率整定和风电场的电压控制, 送端外环控制器采用有功功率控制与定交流电压控制, 图 3 为送端无源控制器。

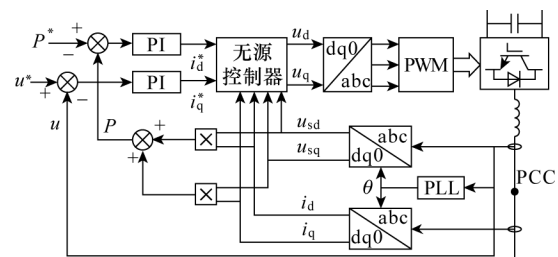


图 3 送端换流器无源解耦控制

Fig.3 Passivity decoupled control for sending-end VSC

受端换流器采用定直流电压控制以满足有功平衡与直流电压稳定, 另外, 外环控制器还采用定交流电压控制, 图 4 为受端无源控制器。

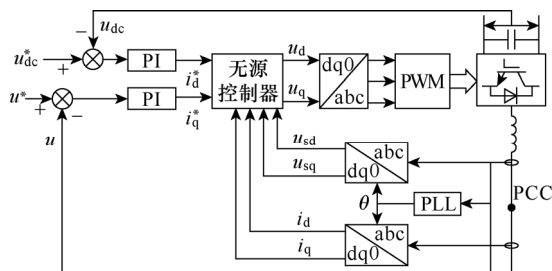


图 4 受端换流器无源解耦控制

Fig.4 Passivity decoupled control for receiving-end VSC

## 5 仿真与分析

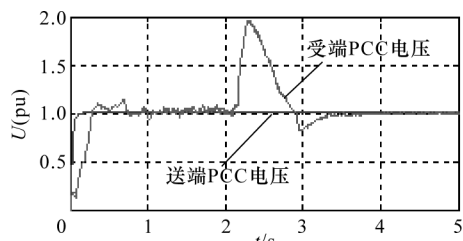
为了验证所提出的控制方法的正确性和优越性, 基于上述柔性直流输电系统的数学模型与无源控制策略, 在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 环境下进行仿真分析。柔性直流输电系统额定直流电压为  $\pm 160\text{kV}$ , 换流器容量为 200MVA, 系统基准容量为 100MVA, 平均风速下风电场有功出力为 180MW, 送端与受端公共连接点电压为 110kV, 无源控制器注入阻尼电阻  $R_a=0.6(\text{pu})$ 。系统仿真时间长度为 20s, 以无源解耦控制和 PI 双闭环控制进行对比分析。另外, 为保证对比分析的有效, 两种控制方法的外环 PI 控制参数选取一致, PI 参数的具体设置见下表所示。仿真结果如图 5 ~ 图 8 所示。

对比分析可知, 无源控制下系统鲁棒性强, 启动更加快速, 约 1s 左右就达到稳定状态。从图 5b、图 6b、图 7 与图 8b 可以看出, 各变量都很快稳定在控制值上, 无振荡、超调量很小。而从图 5a、图 7 及图 8a 可以看出, PI 控制下启动时各变量的超调量与振荡幅度都很大, 达到稳态的时间长。

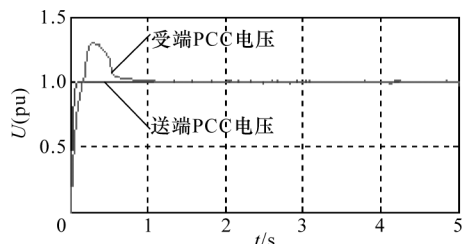
表 控制系统 PI 调节器参数

Tab. Parameters of PI regulators in control system

换流器	调节器	$K_p$	$K_i$	上限	下限
送端	有功功率	2	0.08	2	-2
	交流电压	5	0.08	1	-1
受端	直流电压	500	0.05	1	-1
	交流电压	2	0.08	1	-1



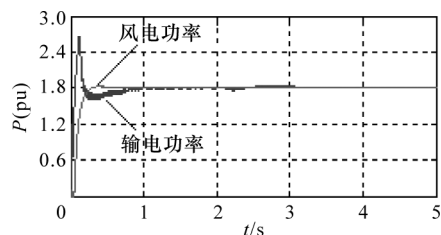
(a) PI 双闭环控制



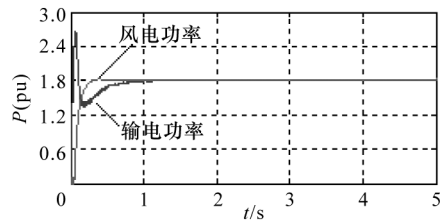
(b) 无源控制

图 5 两种控制方式下 PCC 处电压

Fig.5 Voltage value in PCC under both control strategies



(a) PI 双闭环控制



(b) 无源控制

图 6 两种控制方式下风电功率与输送功率

Fig.6 Wind power and transmitted power under both control strategies

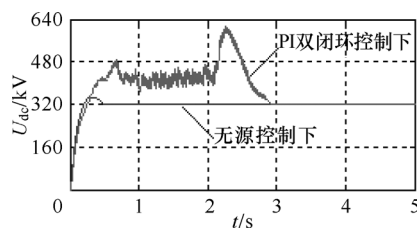


图 7 受端直流电压

Fig.7 DC voltage of receiving end

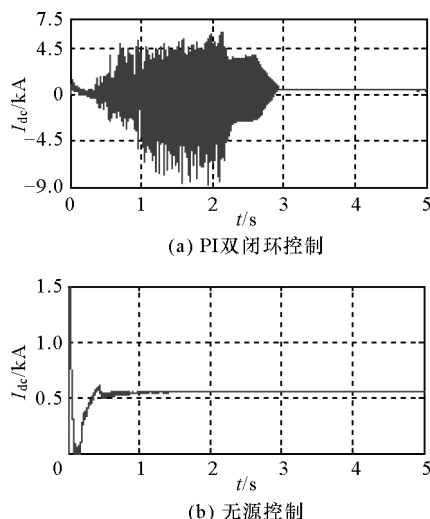


图 8 两种控制方式下直流电流

Fig.8 DC current under both control strategies

为对比分析两种控制方式下的动态响应性能，设置风速在 10s 和 15s 时发生阶跃变化，如图 9 所示。各变量仿真结果如图 10 ~ 图 12 所示。

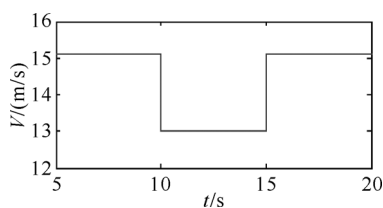


图 9 风速变化

Fig.9 Wind speed change

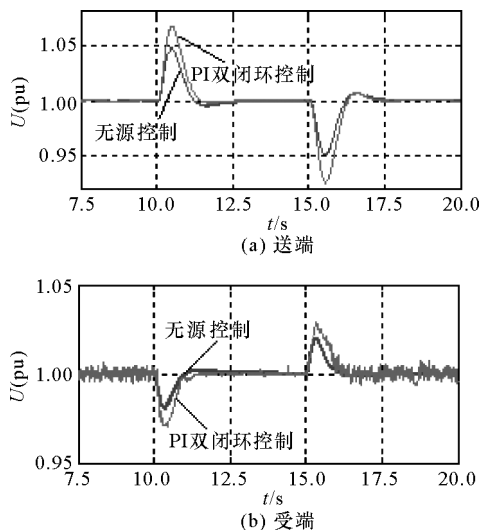


图 10 阶跃风速下 PCC 处电压

Fig.10 Voltage value in PCC under step wind speed

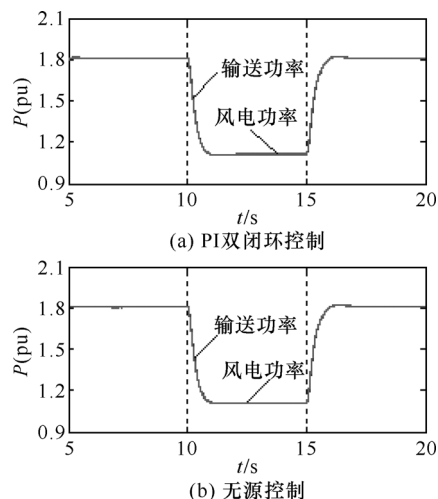


图 11 阶跃风速下风电功率与输送功率

Fig.11 Wind power and transmitted power under step wind speed

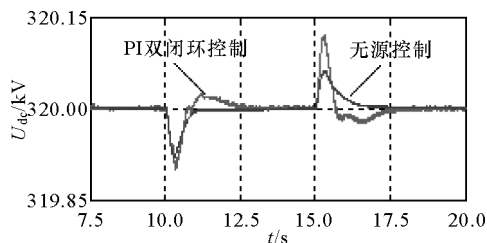


图 12 阶跃风扰动下受端直流电压

Fig.12 DC voltage of receiving end under step wind speed

由仿真结果，当风速发生阶跃变化时，从图 10 可以看出两端连接点处交流电压产生一定幅度的波动，但无源控制下波动幅度与稳态误差更小；从图 11 可以看出柔性直流输电系统输送功率与风电的阶跃变化相一致，在有功±60MW 变化下系统能保持稳定。而从图 12 的对比可知，无源控制下受端直流电压的抗扰动性能强、波动小。

指令受端接入点电压幅值发生阶跃变化模拟接入电网电压扰动，如图 13 所示，系统运行仿真结果如图 14 和图 15 所示。

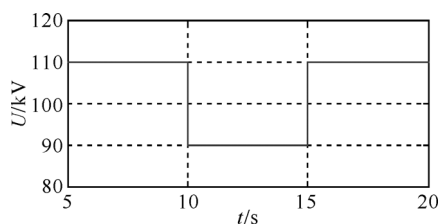
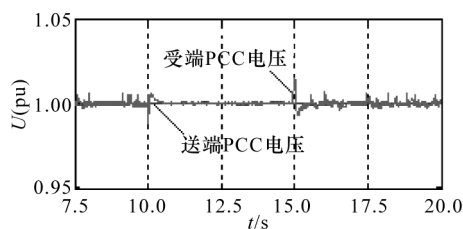
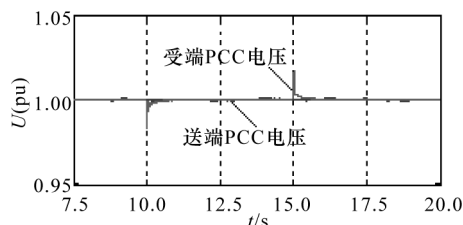


图 13 受端接入点电压阶跃变化

Fig.13 Voltage step change at PCC of receiving end



(a) PI双闭环控制下两端PCC处电压



(b) 无源控制下两端PCC处电压

图 14 受端接入点电压扰动下 PCC 处电压

Fig.14 Voltage value at PCC under voltage disturbance at PCC of receiving end

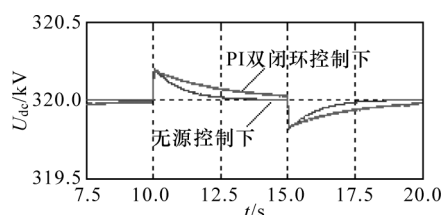


图 15 受端接入点电压扰动下受端直流电压

Fig.15 DC voltage of receiving end under voltage disturbance at PCC of receiving end

从图 14 可以看出,在受端接入点电压阶跃扰动时,两种控制方式下两端连接点交流电压都能稳定在期望值上,扰动变化在允许范围内。但无源控制下纹波小,动、静态性能更良好。从图 15 可看出相比 PI 控制,无源控制下受端直流电压稳态误差更小,动态响应快,扰动消除后能更快恢复到设定值。

考虑风电机组切出时将由电网向风电场供电,设置在 10s 时潮流发生翻转,仿真结果如图 16~图 18 所示。

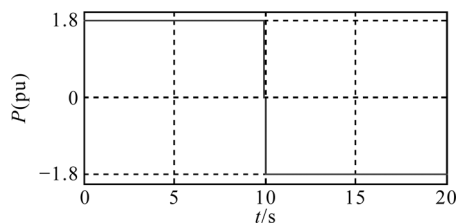
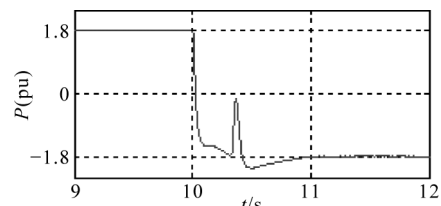
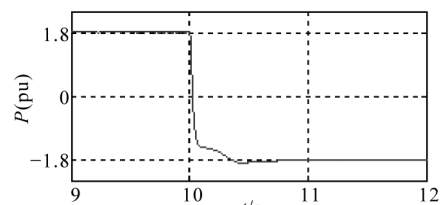


图 16 输送功率参考值

Fig.16 Transmission power reference value



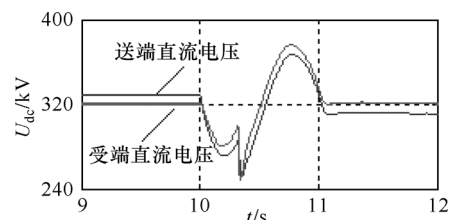
(a) PI双闭环控制



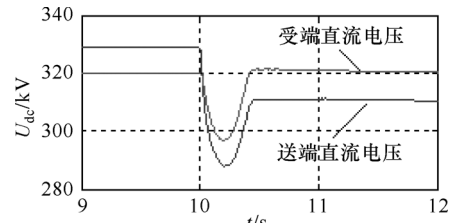
(b) 无源控制

图 17 两种控制方式下的功率传输

Fig.17 Power transmission under both control strategies



(a) PI双闭环控制下两端直流电压



(b) 无源控制下两端直流电压

图 18 两种控制方式下两端直流电压

Fig.18 DC voltages of both ends under both control strategies

由仿真结果可以看出,VSC-HVDC 正向输送功率时,两种控制方法都具有较好的稳态控制性能。但在功率发生阶跃性翻转时,PI 控制下各变量在暂态过程中发生振荡,而无源控制的抗扰动性好、鲁棒性更强,各变量更快达到新稳态。

## 6 结论

柔性直流输电是大型风电接入电网的一种重要方式。大型风电柔性直流输电系统需要更强的鲁棒性,本文提出的换流器无源控制方法具有以下优点:

(1) 从系统能量函数的无源性出发构造 Lyapunov 函数,符合 Lyapunov 稳定理论,具有明

确的物理意义。

(2) 以误差存储函数为 Lyapunov 函数, 并通过注入阻尼使系统快速收敛到期望平衡点并在平衡点具有最小值且实现了各变量的解耦控制。

(3) 基于换流器 EL 数学模型所设计的控制器本质为一种非线性控制方法, 对柔性直流输电系统的非线性特性具有针对性, 得到的控制律简单, 无需微积分计算, 具有较高的工程实用价值。

### 参考文献

- [1] WWEA. World wind energy report 2010[R]. Shanghai, China, 2011.
- [2] 陈宁, 何维国, 钱敏慧, 等. 风电场无功电压控制系统设计和应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 32-36.  
Chen Ning, He Weiguo, Qian Minhui, et al. Design and application of reactive power control system for wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 32-36.
- [3] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.  
Zhang Liying, Ye Tinglu, Xin Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [4] 汤广福, 贺之渊, 滕乐天. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 39-42.  
Tang Guangfu, He Zhiyuan, Teng Letian. New progress on HVDC technology based on voltage source converter[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 39-42.
- [5] Nikolas Flourentzou, Vassilios G Agelidis, Georgios D Demetriades. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 594-599.
- [6] 何大清, 蔡旭. 基于平坦系统的 VSC-HVDC 控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 233-239.  
He Daqing, Cai Xu. Flatness-based control of VSC-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 233-239.
- [7] S M Muyeen, Rion Takahashi, Junji Tamura. Operation and control of HVDC-connected offshore wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1(1): 30-37.
- [8] Bresesti P, Kling W L, Hendriks R L. HVDC connection of off shore wind farms to the transmission system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 37-43.
- [9] Akshaya Moharana, P K Dash. Input-output linearization and robust sliding-mode controller for the VSC-HVDC transmission link[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1952-1961.
- [10] HF Latorre, M Ghandhari. Improvement of power system stability by using a VSC-HVDC[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2011, 33(2): 332-339.
- [11] Zhang Lidong, Harnefors L, Nee H P. Interconnection of two very weak AC systems by VSC-HVDC links using power synchronization control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 345-347.
- [12] 管敏渊, 徐政. 向无源网络供电的 MMC 型直流输电系统建模与控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 255-263.  
Guan Minyuan, Xu Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter based VSC-HVDC system connected to passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 255-263.
- [13] Siye Ruan, Guojie Li, Xiaohong Jiao, et al. Adaptive control design for VSC-HVDC systems based on backstepping method[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(6): 559-565.
- [14] Shuhui Li, Timothy A. Haskew, Ling Xu. Control of HVDC light system using conventional and direct current vector control approaches[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3106-3118.
- [15] 李爽, 王志新, 王国强, 等. 三电平海上风电柔性直流输电变流器的 PID 神经网络滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 20-28.  
Li Shuang, Wang Zhixin, Wang Guoqiang, et al. PID neural network sliding-mode controller for three-level offshore wind power VSC-HVDC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 20-28.



- [16] Lee Tzann Shin. Lagrangian modeling and passivity based control of three-phase AC/DC voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(4): 892-902.
- [17] 王久和, 黄立培, 杨秀媛. 三相电压型 PWM 整流器的无源性功率控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 20-25.  
Wang Jiuhe, Huang Lipei, Yang Xiuyuan. Power control of three-phase boost-type PWM rectifier based on passivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 20-25.
- [18] 杨金明, 刘文明, 赵世伟, 等. 基于无源性理论的开关磁阻直线电机位置控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 56-61.  
Yang Jinming, Liu Wenming, Zhao Shiwei, et al. Position control of linear switched reluctance motor using passivity-based control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 56-61.
- [19] 魏晓光, 迟永宁, 魏晓云, 等. 电压源换相高压直流输电改善异步发电机风电场暂态电压稳定性研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 100-107.  
Wei Xiaoguang, Chi Yongning, Wei Xiaoyun, et al. Transient voltage stability enhancement of induction generator-based wind farm by VSC-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(5): 100-107.
- [20] 孙元章, 焦晓红, 申铁龙. 电力系统非线性鲁棒控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

---

#### 作者简介

范心明 男, 1977 年生, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析运行与稳定控制。

管霖 女, 1970 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向电力系统稳定与控制、电网规划和可靠性、人工智能。

---

#### (上接第 248 页)

- [12] Djordje Babic, Markku Renfors. Power efficient structure for conversion between arbitrary sampling rates[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(1): 1-4.
- [13] 朱国防, 陆于平. 扇环型制动区差动保护算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 172-177.  
Zhu Guofang, Lu Yuping. A novel differential protection with sector-ring restraint region[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 172-177.
- [14] 王业, 陆于平, 徐以超, 等. 一种用于差动保护的新型重采样方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 240-247.  
Wang Ye, Lu Yuping, Xu Yichao, et al. A novel resampling method for differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 240-247.
- [15] paydin G, Realization of reduced-delay finite impulse response filters for audio applications[J]. Digital Signal Processing, 2009, 20(3): 621-629.
- [16] Armand Eyebe Fouda J S, Martin Kom, Alain Tiedeu, et al. Toward a group delay reduction in digital filtering[J]. Digital Signal Processing, 2009, 19(1): 22-32.

---

#### 作者简介

朱超 男, 1987 年生, 博士研究生, 研究方向为变电站自动化与嵌入式系统设计。

梅军 男, 1971 年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为变电站自动化与嵌入式系统设计。