

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.01.006

# 风电场 VSC-HVDC 并网不平衡运行改善控制策略

王国栋<sup>1</sup>, 卢少锋<sup>2</sup>, 张晓佳<sup>1</sup>, 陈志勇<sup>1</sup>, 潘晓明<sup>1</sup>(1. 国网江苏省电力有限公司苏州供电公司, 江苏 苏州 215000;  
2. 华南理工大学吴贤铭智能工程学院, 广东 广州 511442)

**摘要:**风电场柔性高压直流输电(VSC-HVDC)系统交流不平衡运行时,并网输出功率存在二倍电网频率波动,并网电压、电流波形畸变,恶化风电场并网的电能质量。为改善风电柔性高压直流输电系统在交流不平衡状况下的并网性能,针对双馈风电场侧交流不平衡运行状况提出了一种改善控制策略。该改善控制策略在计及相关平波电抗器、变压器等值阻抗影响的基础上,建立了风电场 VSC-HVDC 系统不平衡运行数学模型,并提出基于正负序双  $dq$  解耦轴系下的正负序控制给定电流策略。最后,通过 Matlab/Simulink 仿真平台对比仿真引入改善控制策略前后的系统运行性能,对比结果表明所提改善控制策略可以有效抑制风电场并网功率波动,改善系统并网电压、电流波形。

**关键词:**风力发电;双馈电机;柔性高压直流输电;不平衡电压;电能质量

**中图分类号:** TM72

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2020)01-0044-07

## 0 引言

风能是当前新能源开发的热点之一,大规模风电场并网连接方式有交流和直流 2 种方式。随着全控电子器件发展,柔性高压直流输电(voltage source converter-high voltage direct current, VSC-HVDC)并网方式<sup>[1]</sup>较传统晶闸管直流输电<sup>[2-3]</sup>方式,更适合大规模风电场并网运行<sup>[4]</sup>,目前世界各国都有具体的工程实践<sup>[5]</sup>。

VSC-HVDC 交流不平衡运行时,交流母线电压的负序分量会引起直流母线电压二倍电网频率的脉动<sup>[6]</sup>,从而导致风电场并网输出功率波动。并且,直流二倍频脉动通过直流线路传播到相邻换流站,影响相邻换流站的安全运行。当风电场 VSC-HVDC 并网时,其两侧均存在交流不平衡运行状况,因此对其两侧的风电场侧换流器(wind farm side voltage source converter, WFVSC)和电网侧换流器(grid side voltage source converter, GSVSC)需分别具备各自相应的应对控制策略。而在实际运行情况下,WFVSC 和 GSVSC 各自运行控制目标不同,其相应的不平衡改善控制策略各不相同。

目前关于 GSVSC 交流电压不平衡下的应对策略已有大量的研究工作,而关于 WFVSC 的交流不平衡控制策略却相对较少。文献[7-9]根据瞬时功率理论给出了消除直流母线电压波动的正、负序电流追踪控制;文献[10]基于正负序  $dq$  旋转轴系

给出了消除直流电压波动的正负序电流追踪控制;文献[11]设计了主从控制器来抑制交流负序分量。以上文献的控制策略均是基于抑制功率的二倍频波动来实现的,且都未考虑到并网侧电抗器和变压器等值阻抗对运行控制的影响,而在实际工程运用中,这部分功率波动会引起的输出系统功率波动是不能忽略的。此外,WFVSC 在风电场 VSC-HVDC 并网系统运行中作为一个 slack 节点<sup>[12]</sup>,这使得 WFVSC 不平衡运行改善控制策略无法基于功率来构建。

基于以上考虑,文中提出了一种应对风电场交流不平衡的改善控制策略。首先建立计及并网侧电抗器和变压器等值阻抗的系统不平衡运行数学模型,再基于正负序双  $dq$  解耦轴系,结合风电场母线电压、电流正、负序分量,提出改善风电场侧不平衡运行的负序控制电流给定策略。最后,对比仿真验证了所提改善控制策略的可行性和有效性。

## 1 双馈风电场通过 VSC-HVDC 接入电网的结构模型

双馈风电场 VSC-HVDC 并网系统结构如图 1 所示<sup>[12]</sup>。该系统由双馈电机(doubly fed induction generator, DFIG)风电场、风电场滤波器、WFVSC、直流母线、GSVSC、电网侧滤波器以及风电场侧和电网侧的升/降压变压器等部分构成。

### 1.1 双馈风电场等值模型

目前,双馈风电场等值模型主要有:单机等值模型、简化电功率等值模型、根据风速分群后等值

收稿日期:2019-07-15;修回日期:2019-09-03

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(61603306)

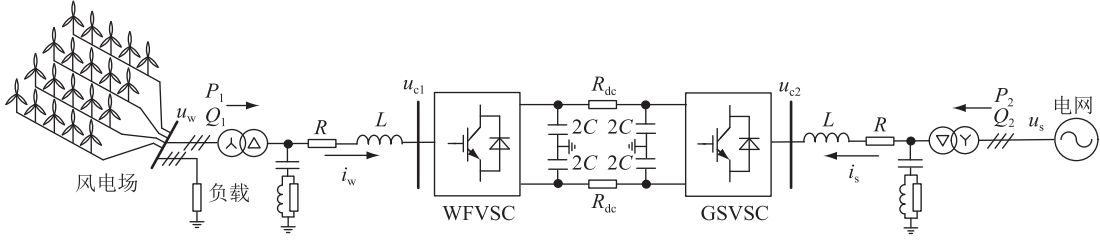


图1 双馈风电场 VSC-HVDC 并网结构

Fig.1 Structure diagram of DFIG wind farm with VSC-HVDC connection

机械功率的单机模型和根据风速分群后的多机等值模型。不同的双馈风电场等值模型其对应的控制设计也不同。文中采用文献[13]的单机等值模型。具体控制策略采用机侧变换器定子磁链定向的最大风能跟踪控制给定,网侧采用电网电压定向的单位功率因数控制给定<sup>[14]</sup>。

## 1.2 WfVSC 等值模型

WfVSC 在系统运行中作为一个 slack 节点,控制风电场交流母线电压的幅值和相位,从而收集风电场送出来的能量。WfVSC 在  $dq$  同步坐标系下的暂态数学模型为:

$$\begin{cases} L_w \frac{di_{wd}}{dt} = -R_w i_{wd} + \omega_w L_w i_{wq} - u_{cwd} + u_{wd} \\ L_w \frac{di_{wq}}{dt} = -R_w i_{wq} - \omega_w L_w i_{wd} - u_{cwq} + u_{wq} \end{cases} \quad (1)$$

稳态数学模型为:

$$\begin{cases} u_{wd} = R_w i_{wd} - \omega_w L_w i_{wq} + u_{cwd} \\ u_{wq} = R_w i_{wq} + \omega_w L_w i_{wd} + u_{cwq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u_{wd}, u_{wq}$ 分别为风电场母线电压的  $d, q$  轴分量; $i_{wd}, i_{wq}$ 分别为 WfVSC 交流侧输入电流的  $d, q$  轴分量; $u_{cwd}, u_{cwq}$ 分别为 WfVSC 交流侧基波电压的  $d, q$  轴分量; $R_w, L_w$ 分别为考虑 WfVSC 交流侧变压器和平波电抗的等值电阻和电抗; $\omega_w$ 为交流母线电压角频率。

## 2 风电场交流不平衡运行的改善控制策略

### 2.1 交流不平衡运行下的 WfVSC 动态模型

在实际控制中,为实现独立解耦控制,通常需要将获得的电磁量表达成同步  $dq$  轴系下的状态量。在风电场母线电压不平衡运行情况下,由于同时存在正负序分量,需要分别建立正序  $dq^+$  轴系和负序  $dq^-$  轴系,实现控制系统中电磁量正、负序分量的独立解耦控制<sup>[11,15]</sup>。

将式(1)的电磁状态量重新整理得到在交流不平衡时,基于正、负序  $dq$  轴系下的 WfVSC 的动态方程为:

$$\begin{cases} U_{cwdq^+}^+ = U_{wdq^+}^+ - R_w I_{wdq^+}^+ - j\omega_w L_w i_{wdq^+}^+ - L_w \frac{dI_{wdq^+}^+}{dt} \\ U_{cwdq^-}^- = U_{wdq^-}^- - R_w I_{wdq^-}^- + j\omega_w L_w i_{wdq^-}^- - L_w \frac{dI_{wdq^-}^-}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

其中,正负序电压  $U_{dq}$ 、电流  $I_{dq}$  相量是  $dq$  分量的相量表达,即  $U_{dq} = U_d + jU_q, I_{dq} = I_d + jI_q$ 。

这样依据式(3)可以实现对系统电压、电流的正、负序分量在各自的正、负序  $dq$  轴系下做独立解耦控制。对于 VSC-HVDC 的直流侧,根据功率平衡可以得到动态方程:

$$\begin{aligned} C \frac{du_{dc}}{dt} &= 1.5\eta \text{Re} [ (S_{wdq^+}^+ e^{j\omega_w t} + S_{wdq^-}^- e^{-j\omega_w t}) \times \\ & (\hat{I}_{wdq^+}^+ e^{-j\omega_w t} + \hat{I}_{wdq^-}^- e^{j\omega_w t}) ] - i_{dc} = \\ & 1.5\eta \text{Re} [ S_{wdq^+}^+ \hat{I}_{wdq^+}^+ + S_{wdq^-}^- \hat{I}_{wdq^-}^- + \\ & S_{wdq^+}^+ \hat{I}_{wdq^-}^- e^{j2\omega_w t} + S_{wdq^-}^- \hat{I}_{wdq^+}^+ e^{-j2\omega_w t} ] - i_{dc} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $C$ 为直流母线稳压电容; $\eta$ 为换流器的功率转换效率; $i_{dc}$ 为直流侧电流; $S_w$ 为 WfVSC 交流侧输出功率。

对于小容量的开关换流器件,通常选取开关频率在 10 kHz 以上,而大容量的柔性高压直流输电系统在实际工程中,为降低换流器电子开关器件的功率损耗,通常选取较低的开关频率(约为 1~2 kHz)<sup>[6,16]</sup>。WfVSC 交流侧的接入电抗器和变压器在此频率下具有不可忽略的等值阻抗,为进一步改善风电场并网电能质量,将其等值阻抗在交流母线不平衡运行情况下出现的功率波动考虑在内,得到 WfVSC 在正、负序  $dq$  轴系下的瞬时有功、无功为:

$$\begin{aligned} & [P_{c0} \quad Q_{c0} \quad P_{ccos2} \quad P_{csin2} \quad Q_{ccos2}]^T = \\ & [P_{w0} \quad Q_{w0} \quad P_{wcos2} \quad P_{wsin2} \quad Q_{wcos2}]^T - \\ & 1.5R_w \begin{bmatrix} -i_{wd^+}^+ & -i_{wq^+}^+ & -i_{wd^-}^- & -i_{wq^-}^- \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2i_{wd^+}^+ & -2i_{wq^+}^+ \\ 0 & 0 & 2i_{wq^+}^+ & -2i_{wd^+}^+ \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{wd^+}^+ \\ i_{wq^+}^+ \\ i_{wd^-}^- \\ i_{wq^-}^- \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$1.5\omega_w L_w \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -i_{wd+}^+ & -i_{wq+}^+ & i_{wd-}^- & i_{wq-}^- \\ 0 & 0 & 2i_{wq+}^+ & -2i_{wd+}^+ \\ 0 & 0 & 2i_{wd+}^+ & 2i_{wq+}^+ \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{wd+}^+ \\ i_{wq+}^+ \\ i_{wd-}^- \\ i_{wq-}^- \end{bmatrix} - 1.5 \begin{bmatrix} u_{wd-}^- & u_{wq-}^- & u_{wd+}^+ & u_{wq+}^+ \\ u_{wq-}^- & -u_{wd-}^- & -u_{wq+}^+ & u_{wd+}^+ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{wd+}^+ \\ i_{wq+}^+ \\ i_{wd-}^- \\ i_{wq-}^- \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} P_{w0} & Q_{w0} & P_{w\cos2} & P_{w\sin2} & Q_{w\cos2} \end{bmatrix}^T = -1.5 \begin{bmatrix} u_{wd+}^+ & u_{wq+}^+ & u_{wd-}^- & u_{wq-}^- \\ u_{wq+}^+ & -u_{wd+}^+ & u_{wq-}^- & -u_{wd-}^- \\ u_{wd-}^- & u_{wq-}^- & u_{wd+}^+ & u_{wq+}^+ \\ u_{wq-}^- & -u_{wd-}^- & -u_{wq+}^+ & u_{wd+}^+ \\ u_{wq+}^+ & -u_{wd+}^+ & u_{wq-}^- & -u_{wd-}^- \\ -u_{wd-}^- & -u_{wq-}^- & u_{wd+}^+ & u_{wq+}^+ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{wd+}^+ \\ i_{wq+}^+ \\ i_{wd-}^- \\ i_{wq-}^- \end{bmatrix} \quad (6)$$

结合式(5)和式(6)可以看出,在系统交流电压不平衡的情况下,WFVSC 输出的有功、无功存在着平均有功、无功分量  $P_{w0}, Q_{w0}$ ; 二倍频  $\sin, \cos$  的有功、无功分量  $P_{w\sin2}, P_{w\cos2}, Q_{w\sin2}, Q_{w\cos2}$ 。

## 2.2 WFVSC 控制策略设计

风电场母线电压不平衡时引起 WFVSC 输出直流母线电压的二倍频的波动,而直流母线电压的波动必然会造成 GSVSC 输出有功功率的波动,从而影响风电场 VSC-HVDC 系统提供给电网的电能质量。为改善风电场并网电能质量,WFVSC 控制目标就成为抑制母线电压的二倍频波动。根据式(6)可重新整理出 WFVSC 交流侧的有功二倍频波动分量为:

$$\begin{bmatrix} P_{w\cos2} \\ P_{w\sin2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{w\cos2} - P_{X\cos2} \\ P_{w\sin2} - P_{X\sin2} \end{bmatrix} =$$

式中:  $P_{w\cos2}, P_{w\sin2}$  分别为 WFVSC 交流侧端口处的二倍频有功波动;  $P_{X\cos2}, P_{X\sin2}$  分别为风电场侧电抗器和变压器的等值感抗给 WFVSC 交流侧端口所带来二倍频有功波动,这里忽略了等值电阻对有功波动的影响。  $P_{X\cos2}$  和  $P_{X\sin2}$  分别定义为:

$$\begin{bmatrix} P_{X\cos2} \\ P_{X\sin2} \end{bmatrix} = 3\omega_w L_w \begin{bmatrix} i_{wq+}^+ & -i_{wd+}^+ \\ i_{wd+}^+ & i_{wq+}^+ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{wd-}^- \\ i_{wq-}^- \end{bmatrix} \quad (8)$$

为了有效控制直流侧的电压无二倍频波动,需要控制 WFVSC 交流侧端口处的二倍频有功波动为 0,即  $P_{w\cos2} = 0, P_{w\sin2} = 0$ 。由此,依据式(7),可以得到 WFVSC 控制器的负序电流给定为:

$$\begin{bmatrix} i_{wd-}^{*-} \\ i_{wq-}^{*-} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} u_{wd+}^+ & u_{wq+}^+ \\ -u_{wq+}^+ & u_{wd+}^+ \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u_{wd-}^- & u_{wq-}^- \\ u_{wq-}^- & -u_{wd-}^- \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{wd+}^+ \\ i_{wq+}^+ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{wd+}^+ & u_{wq+}^+ \\ -u_{wq+}^+ & u_{wd+}^+ \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} P_{X\cos2} \\ P_{X\sin2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(9)可以看出,WFVSC 的负序电流给定可以完全不需要风电场输出功率的信息,只由已知的风电场母线电压、电流来构建,这也是 WFVSC 在风电场电压不平衡运行下的控制特点。

WFVSC 的正序电流给定计算,可参考文献[12]。综合文献[12]和式(9)可得到风电场电网电压不平衡下的 WFVSC 的控制电流给定。该控制电流给定是基于风电场母线电压、电流的计算,并计及电抗器和变压器等值阻抗的影响而构建出的。图 2 给出了风电场母线电压不平衡下 WFVSC 的控制原理框图。

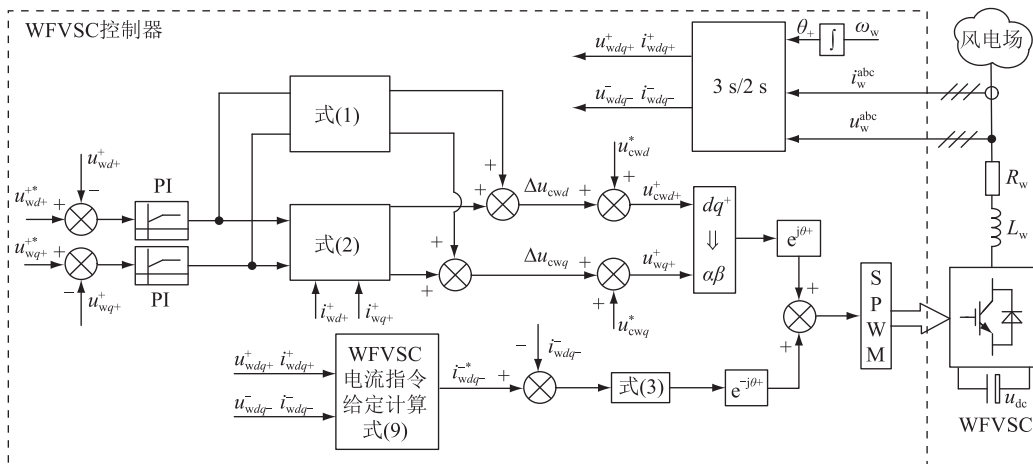


图 2 风电场母线电压不平衡下的 WFVSC 控制原理

Fig. 2 Structure of proposed control strategy

在基于正、负序  $dq$  轴系下,采用  $T/4$  延时法<sup>[16]</sup> 实现整个控制系统的正负序分离,结合所设计的 Wfvsc 正、负序电流设计给定,得到完整的控制框图。

### 3 仿真实验

为了验证文中所提改善控制策略的有效性,依据图 1 所示结构图,在 Matlab/Simulink 仿真平台搭建仿真模型。双馈风电场总容量为 200 MW,采用的 DFIG 单机容量为 2 MW。VSC-HVDC 采用三电平中性点钳位的换流器,晶闸管为全控晶闸管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 串并联结构方式<sup>[17]</sup>,IGBT 额定电压 3.3 kV,额定电流 1.5 kA。容量 200 MW,直流母线电压为  $\pm 150$  kV,直流输电线路长 100 km。风电场通过 690 V/35 kV,35 kV/110 kV 的两级变压器  $T_{1-1}$ 、 $T_{1-2}$  连接到 Wfvsc,而 Gsvsc 通过 110 kV/230 kV 的一级变压器  $T_2$  连接到电网。表 1 为具体系统仿真参数。

表 1 风电场柔性高压直流输电系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters for wind farm with VSC-HVDC connection

系统模块	参数	数值
DFIG 单 机等值	额定频率/Hz	50
	定子额定电压/V	690
	定子电阻 $R_s$ /p.u.	0.006 01
	定子漏感 $L_{ls}$ /p.u.	0.062 4
	转子电阻 $R_r$ /p.u.	0.009 93
	转子漏感 $L_{lr}$ /p.u.	0.075 2
	定、转子互感 $L_m$ /p.u.	3.97
	极对数	2
VSC-HVDC	运行方式	三电平
	额定容量/MW	200
	直流母线电压/kV	$\pm 150$
	直流输电线路长/km	100
	风电场侧变压器 $T_{1-1}$ 、 $T_{1-2}$	690 V/35 kV, 35 kV/110 kV
	电网侧变压器 $T_2$	110 kV/230 kV
	开关频率/Hz	2 000
IGBT 模块	额定电压/kV	3.3
	额定电流/kA	1.5
	最高运行结温/ $^{\circ}\text{C}$	150
	结构方式	串并联

图 3 和图 4 分别给出了在风电场母线电压出现稳态不平衡运行情况下,DFIG 风电场 VSC-HVDC 并网系统在引入所提控策略前后的运行情况。

对比图 3 和图 4 可以看出,当风电场母线出现不平衡运行状况时,在没有引入改善控制策略的情

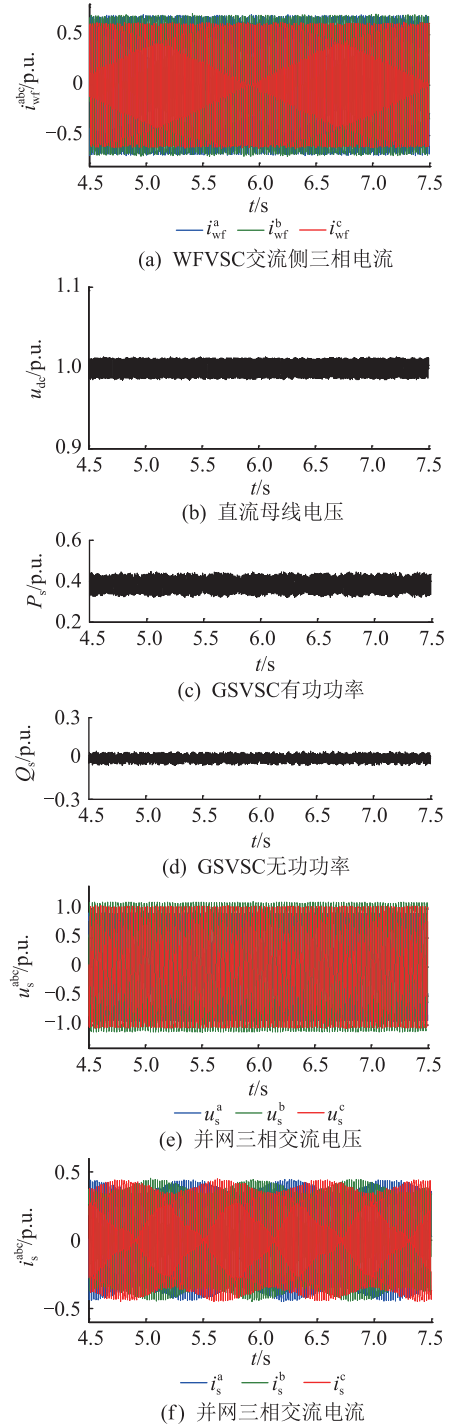


图 3 风电场母线电压不平衡时风电场 VSC-HVDC 系统的运行情况仿真

Fig.3 Simulation of wind farm with VSC-HVDC connection under unbalanced wind farm voltage

况下,直流母线电压会出现二倍电网频率的波动,如图 3(b)所示;直流母线电压的波动引起 Gsvsc 输出有功、无功同样出现二倍频波动,如图 3(c)、图 3(d)所示。此外,从图 3(e)和图 3(f)可以看出,Gsvsc 提供给电网的电压和电流都出现不同程度的畸变,这意味着风电场输入到电力系统的电能质量存在一定程度的恶化。而引入文中所提改善控

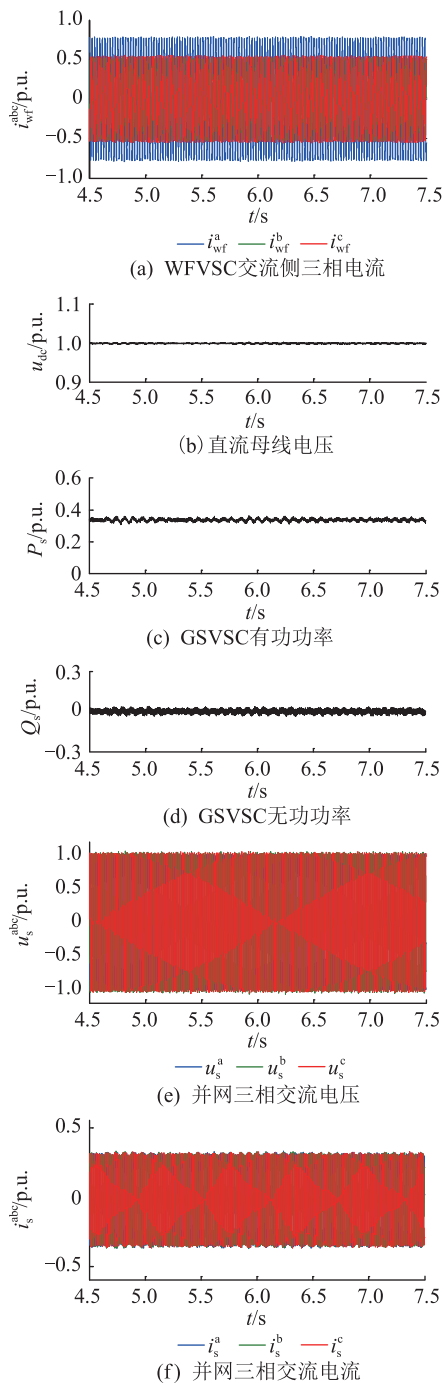


图4 风电场母线电压不平衡时引入改善控制策略后风电场 VSC-HVDC 系统的运行情况仿真

Fig.4 Simulation of wind farm with VSC-HVDC connection with proposed control strategy

制策略后,图 4(b) 直流母线电压的二倍频波动得到了很好的抑制,相应的,GSVSC 的有功、无功输出的二倍频功率波动也有了明显的抑制,如图 4(c)、图 4(d) 所示。同时,图 4(e) 和图 4(f) 可以看出 GSVSC 提供给电网的电压和电流波形有明显的改善,这说明风电场并网的电能质量有更好的保障。图 5、图 6 更进一步给出了仿真时间段为 5.5~5.7 s 引入改善控制策略前后的对比放大图。

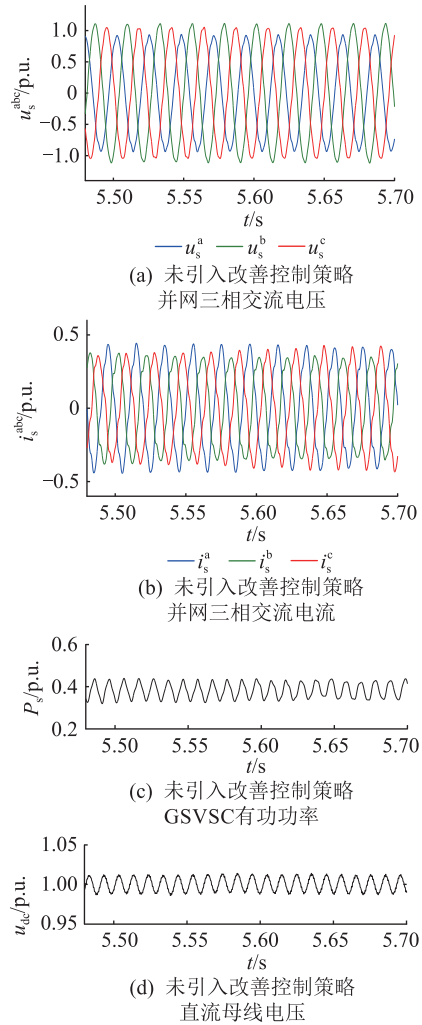


图5 风电场母线电压不平衡时风电场 VSC-HVDC 系统的运行情况仿真(5.5~5.55 s)

Fig.5 Simulation of wind farm with VSC-HVDC connection under unbalanced wind farm voltage(5.5~5.55 s)

对比图 5 和图 6,可以明显看出风电场 VSC-HVDC 系统提供给电网的  $u_s^{abc}$ ,  $i_s^{abc}$ ,  $P_s$  的波形畸变都有明显的改善。通过观察图 5(c) 和图 5(d) 的波形,在引入所提控制策略前,在 5.5~5.55 s 的 0.05 s 时间段内,风电场 VSC-HVDC 系统提供给电网的有功波形及其自身直流母线波形有 5 个波头,即存在 100 Hz 的二倍频电网频率的波动,引入改善控制策略后,图 6(c) 和图 6(d) 的波形说明改善控制策略有效抑制了不平衡运行情况下负序分量带来的风电场柔性高压直流输电系统带给电网的二倍频电网频率波动影响。

图 7 则给出了所提改善控制策略  $dq$  解耦轴系下的负序电流给定值的输出波形。此外,对比图 3(a) 和图 4(a) 可以看出,在引入抑制直流母线二倍频电压波动的控制策略后,风电场母线电流的畸变程度加重,这是由于在抑制直流母线二倍频电压波动的控制策略是采用注入负序电流的方式来实现

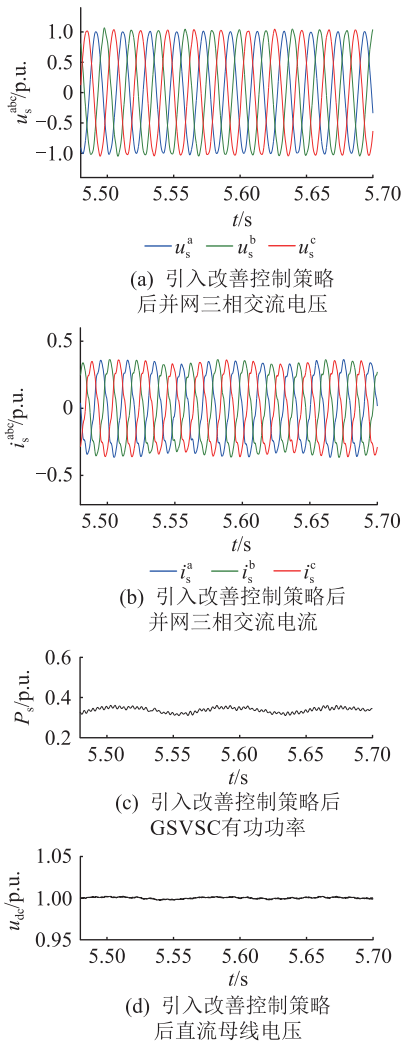


图6 风电场母线电压不平衡时引入改善控制策略后风电场 VSC-HVDC 系统的运行情况仿真(5.5~5.55 s)  
Fig.6 Simulation of wind farm with VSC-HVDC connection with proposed control strategy(5.5~5.55 s)

的,因而会导致风电场母线电流的畸变,这说明直流母线二倍频电压波动抑制是以牺牲风电场母线电流的波形性能来实现的。

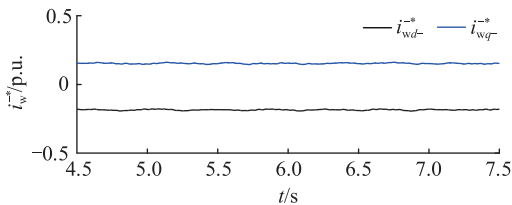


图7 双dq轴系下WFVSC的负序电流给定  
Fig.7 Negative sequence current setting for WFVSC under dual dq shafting

## 4 结语

为改善风电场 VSC-HVDC 系统交流不平衡运行性能,文中提出了一种应对风电场交流不平衡的改善控制策略,该控制策略基于正负序 dq 解耦坐标

系,同时计及换流器交流侧的接入电抗器和变压器的等值阻抗的影响,无需风电场输出功率信息,只依靠风电场母线电压、电流来构建正负序电流控制给定。通过仿真结果对比,表明文中所提控制策略能够有效抑制风电场柔性高压直流输电系统的并网输出功率二倍频波动,改善了风电场并网电压、电流输出波形。随着多电平换流器在柔性直流输电系统实践应用的推广,如何改善多电平换流器交流母线电压不平衡运行性能,将是下一步的研究内容。

## 参考文献:

- [1] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34):6007-6020.  
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE 2014, 34(34):6007-6020.
- [2] 陈中,朱政光,周涛. 基于换相面积 CSCC-HVDC 输电特性研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1):6-13.  
CHEN Zhong, ZHU Zhengguang, ZHOU Tao. Transmission characteristics of CSCC-HVDC based on commutation area[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1):6-13.
- [3] 刘建坤,王蒙,张宁宇,等. 基于 UPFC 抑制 HVDC 换相失败的控制方法研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5):86-91.  
LIU Jiankun, WANG Meng, ZHANG Ningyu, et al. The control method of HVDC communication failure based on UPFC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5):86-91.
- [4] ONI O E, DAVIDSON I E, MBANGULA K N I. A review of LCC-HVDC and VSC-HVDC technologies and applications [C]//Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering. IEEE, 2016.
- [5] 蒋冠前,李志勇,杨慧霞,等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15):145-153.  
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15):145-153.
- [6] LEON A E, MAURICIO J M, SOLSONA J A, et al. Adaptive control strategy for VSC-based systems under unbalanced network conditions [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3):311-319.
- [7] CHEN S, JOOS G, MORAN L T. Dynamic performance of PWM STATCOMs operating under unbalance and fault conditions in distribution systems [C]//Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE, Columbus, OH 2001:950-955.
- [8] JACOBINA C B, CORREA M B R, PINHEIRO R F, et al. Modeling and control of unbalanced three-phase systems containing PWM converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(6):1807-1816.
- [9] HOCHGRAF C, LASSETER R H. Statcom controls for operation with unbalanced voltages [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(2):538-544.

- [10] 何斌,张秀彬,赵兴勇. 电压不对称条件下电压源换流器式高压直流输电的自适应无源控制[J]. 电网技术,2007,31(14):68-73.  
HE Bin,ZHANG Xiubin,ZHAO Xingyong. Adaptive passivity-based control for VSC-HVDC system under unbalanced voltage condition[J]. Power System Technology, 2007, 31(14):68-73.
- [11] XU Lie, ANDERSEN B R, CARTWRIGHT P. VSC transmission operating under unbalanced AC conditions-analysis and control design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1):427-434.
- [12] 廖勇,王国栋. 双馈风电场的柔性高压直流输电系统控制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(28):7-15.  
LIAO Yong,WANG Guodong. VSC-HVDC system control for grid-connection of DFIG wind farms[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(28):7-15.
- [13] XU L,YAO L,SASSE C. Grid integration of large DFIG-based wind farms using VSC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(3):976-984.
- [14] SUN D,WANG X,FANG Y. Backstepping direct power control without phase-locked loop of AC/DC converter under both balanced and unbalanced grid conditions[J]. IET Power Electronics,2016,9(8):1614-1624.
- [15] 庄凯. 直驱永磁同步风电机组并网变换器关键技术研究[D]. 重庆:重庆大学. 2012.  
ZHUANG Kai. Research on the key technologies of grid-connected converter for PMSG-based direct-driven wind turbine generation system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [16] DU Chuiqing. VSC-HVDC for industrial power systems[D]. Goteborg,Sweden:Chalmers University of Technology,2007.
- [17] 杨涛,刘国平,黄森,等. 双馈风电场柔性高压直流输电并网控制策略[J]. 重庆大学学报,2015,38(1):1-11.  
YANG Tao,LIU Guoping,HANG Miao,et al. A new control design for grid integration of DFIG wind farm with VSC-HVDC[J]. Journal of Chongqing University,2015,38(1):1-11.

作者简介:



王国栋

王国栋(1984),男,博士,高级工程师,从事柔性直流输电相关工作(E-mail:wgdonline@163.com);

卢少峰(1984),男,博士,副教授,研究方向为智能电网运行控制;

张晓佳(1973),男,硕士,高级工程师,从事电力系统自动化相关工作。

## An improved control strategy for wind farm with VSC-HVDC under unbalanced voltage

WANG Guodong<sup>1</sup>, LU Shaofeng<sup>2</sup>, ZHANG Xiaojia<sup>1</sup>, CHEN Zhiyong<sup>1</sup>, PAN Xiaoming<sup>1</sup>

(1. State Grid Suzhou Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co.,Ltd., Suzhou 215000, China; 2. Shien-Ming Wu School of Intelligent and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 511442, China)

**Abstract:** When there is unbalanced AC voltage in Wind farm with voltage source converter-high voltage direct current (VSC-HVDC) integration system, the output power to the grid will fluctuate with twice of the grid frequency, and the grid voltage and current waveforms, even more, will be distorted, hence the power quality of the wind farm provided will deteriorate badly. To improve the performances of wind farm VSC-HVDC system under unbalanced AC voltage, a doubly-fed wind farm VSC-HVDC system with unbalanced AC condition is discussed in this paper. Based on the positive and negative sequence double dq decoupling shafting, and taking into account the influence of equivalent impedance of the relevant reactor and transformer, the unbalanced mathematical model of the wind farm VSC-HVDC system is established. Moreover, an improved control strategy is realized with the construction of the positive and negative sequence current setting. Finally, a DFIG wind farm VSC-HVDC system is implemented on the Matlab/Simulink, comparisons of the simulation results with and without the proposed control strategy show that the proposed improved control strategy can effectively suppress the fluctuation of output power and improve the waveform of grid voltage and current.

**Keywords:** wind power; doubly fed induction generator(DFIG); high voltage direct current (HVDC); unbalanced ac voltage; power quality

(编辑 钱悦)