

# PSS/E 中的双馈风机模型

李 娜, 徐 政\*

(浙江大学 电机工程系, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 针对大型风电场接入电网带来的问题,采用PSS/E 32版本中的双馈式感应风力发电机(DFIG)模型进行了风电场特性及其并网的相关研究。首先对发电机-换流器模型(WT3G)、电气控制模型(WT3E)、风力机及传动轴系模型(WT3T)、桨距角控制模型(WT3P)以及保护模块的工作原理进行了详细分析,并针对WT3G的低压有功逻辑环节、WT3E无功通道中的无功控制和电压控制模块以及有功通道中的速度功率曲线、WT3P中桨距角控制的作用、WT3T中的气动力学模型进行了具体阐述,进而通过具有针对性的典型算例仿真,验证了双馈风机模型的特性和有效性。研究表明,闭环电压控制的参数输入对风机电压稳定性具有很大影响,此外PSS/E风机模型中不包含低电压穿越等保护模块,可通过自定义保护模块来满足电网技术规定的要求。

**关键词:** 双馈感应风机; PSS/E; 闭环电压控制; 无功控制; 低电压穿越

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)09-1080-05

## Double fed induction generator model in PSS/E

LI Na, XV Zheng

(Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Aiming at the influence of large-scale wind farms on grid, the doubly-fed induction generator (DFIG) of wind turbine type model in PSS/E of version 32 was adopted for the simulations of wind farm characteristics and related research on the connection of wind farms into grid. Sections of the model were firstly demonstrated in details, namely WT3G, WT3E, WT3T and WT3P. In particular, the following modules were developed: the LVPL module in WT3G; the reactive power control, the close loop voltage control and the power-speed curve in WT3E; the influence of WT3P; the aerodynamics model in WT3T. Then, a typical power system case was simulated and the characteristics of the DFIG models were validated. The results indicate that, the inputs of close loop voltage control limits influence the stability significantly and the WTG models lack protections such as the low voltage ride through (LVRT) module, which can be self-defined by users in order to meet the requirements of the grid code.

**Key words:** doubly-fed induction generator (DFIG); PSS/E; closed loop voltage control; reactive power control; low voltage ride through (LVRT)

## 0 引 言

全世界范围内的能源紧缺日益严重,开发新能源发电技术迫在眉睫。风力发电已经成为发展最快的清洁能源之一<sup>[1]</sup>,其中,双馈式感应风力发电机因其运行区间广、效率高、变流器容量小等优点被广泛投入使用<sup>[2]</sup>。

双馈式感应发电机(DFIG)主要是由风机、齿轮箱、感应发电机、功率变流器、跨接器组成。电流通过

感应发电机的滑环进出转子绕组,转子通过AC-DC-AC功率变流器与电网相连,实现了电网频率和机械频率的解耦控制<sup>[3]</sup>。跨接器对风机变流器起到保护作用<sup>[4]</sup>。

PSS/E是由西门子公司开发的电力仿真软件,已经成为在电力系统广泛应用的软件之一,在其平台上开发的风电模型专门用于风电场特性及其并网的相关研究<sup>[5]</sup>。许多风机生产商提供PSS/E模型,以用于输电网技术规范的校验。

收稿日期: 2012-03-19

作者简介: 李 娜(1987-),女,山西太原人,主要从事交直流电力系统分析、风电并网仿真方面的研究。E-mail: linazjue@126.com

通信联系人: 徐 政,男,教授,博士生导师。E-mail: xuzheng007@zju.edu.cn

在大型变速恒频风力发电系统中双馈型风机比重很大,并且随着双馈风机的单机容量和装机容量不断提升,对风电场和电网之间互相影响的研究具有更加重要的意义<sup>[6]</sup>。因此本研究将系统地介绍基于PSS/E软件32版本中的双馈感应风力发电机的WT3模型,同时,本研究根据模型特点进行有针对性的单机无穷大系统的仿真测试,通过仿真结果验证PSS/E中双馈风机模型的特性,并得出相关结论。

### 1 PSS/E的双馈风机建模

PSS/E的双馈风机根据GE公司的风机进行建模,主要用于大型风电场的正序相量时域仿真分析。完整的双馈风机模型包括:发电机-换流器模型(WT3G)、电气控制模型(WT3E)、风力机及传动轴系模型(WT3T)、桨距角控制模型(WT3P)<sup>[7-8]</sup>。它们之间的关系如图1所示<sup>[9]</sup>。

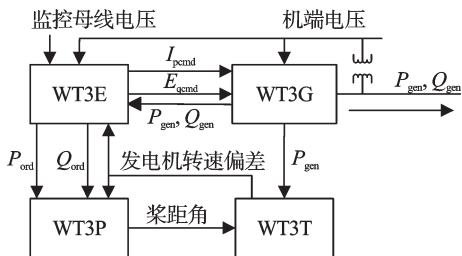


图1 WT3的分块模型框图

$I_{pcmd}$ —控制有功的电流命令值;  $E_{qcmd}$ —控制无功的电压命令值;  $P_{ord}$ ,  $Q_{ord}$ —有功和无功功率指令值

#### 1.1 发电机-换流器模型(WT3G)

WT3G是发电机和换流器的等效模型,也是风机和网络的接口,其模型框图如图2所示,PSS/E的32版本推荐使用改进后的模型WT3G2。与传统的发电机不同,WT3G模型的网络接口简化为代数运算的可控电流源。在计算的时间步长内,本研究保持  $E_{qcmd}$  和  $I_{pcmd}$  恒定不变。根据有功命令  $I_{pcmd}$  和  $q$  轴电动势  $E_{qcmd}$  以及次暂态电抗  $X_{eq}$ ,可以计算得到注入电流  $I_{source}$ ,经过发电机参考系和电网参考系之间的转换矩阵  $T$  注入电网<sup>[10]</sup>,  $T$  表达式为:

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

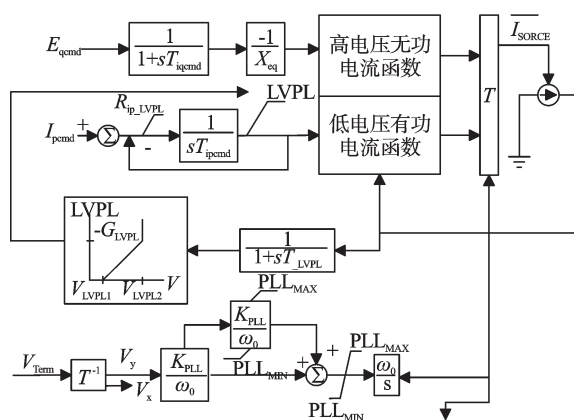
式中:  $\theta$  —发电机的转子位置角。

两个一阶惯性环节  $T_{iqcmd}$  和  $T_{ipcmd}$  用来表示转子侧换流器的作用,通常被设置成比较小的时间滞后值,如0.02 s。

低电压有功逻辑(LVPL)为有功通道上的限幅环

节,其控制曲线由  $V_{LVPL1}$ 、 $V_{LVPL2}$  和  $G_{LVPL}$  定义。当机端电压  $V_{term}$  过低时,有功功率输出会受到上限的限制,这样可以减少故障中与故障后的系统电压恢复压力,使无功具有调控优先权。在模型中,研究者应注意  $G_{LVPL}$  设置为小于10,  $V_{LVPL2}$  设置在0.5~1之间,并且大于  $V_{LVPL1}$ <sup>[11]</sup>。  $T_{LVPL}$  为电压传感器滤波时间常数。此外,有功电流的上升速率也受到了  $R_{ip,LVPL}$  的限制。

在发生严重的电压下降时,图2中的低压有功电流函数通过减少有功电流传输,可以使机端电压  $V_{term}$  低于0.8 p.u.时尽快恢复。当电压上升过高时,图2中的高压无功电流函数可以通过减少无功电流的传输来限制机端电压  $V_{term}$  不超过1.20 p.u.。图2下方为锁环节(PLL),用来同步发电机的转子和定子电流。



$K_{PLL} = K_{ipLL} = 0$ 时  $V_{term}$  的相角

图2 WT3G2模型框图

$K_{PLL}$ —锁环比例系数;  $K_{ipLL}$ —锁环积分系数

#### 1.2 桨距角控制模型(WT3P)

桨距角控制对动态仿真结果影响很大,该模型的具体框图如图3所示。当发电机转速偏差  $SPEED$  大于参考值  $WNDSP1$ (可从图4中的转速功率曲线得

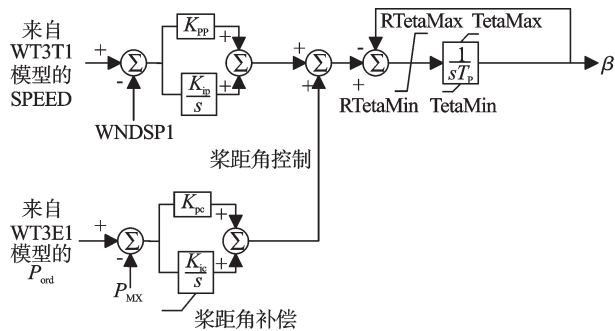


图3 桨距控制模型

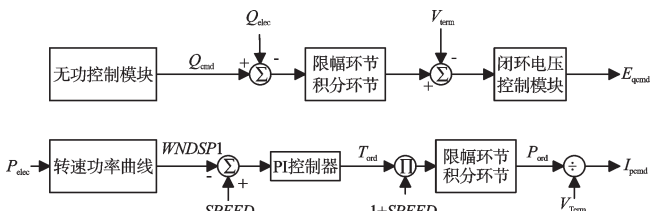


图4 电气控制模型WT3E框图

到)或者功率指令值  $P_{ord}$  大于发电机最大功率值(额定值)  $P_{max}$  时,通过增大桨距角  $\beta$  可降低气动转矩,使功率降回到额定值,从而减小发电机转子转速。

桨距角控制和桨距角补偿都是非饱和积分器。当桨距角达到积分器范围( $Te ta_{Max}$  或  $Te ta_{Min}$ )时,积分器输入将设置为 0,这将使得桨距角命令值  $\theta_{cmd}$  远离积分器的限值。同时桨距角变化受到速率限制,即模型中的  $RTe ta_{Max}$  和  $-RTe ta_{Max}$ 。

### 1.3 电气控制模型(WT3E)

电气控制模型 WT3E 模拟了有功和无功的解耦控制,本研究根据其控制原理将模型整体框图简化为如图 4 所示的框图。

(1) 无功控制通道。如图 4 所示,本研究将无功功率  $Q_{elec}$  与其命令值  $Q_{cmd}$  进行比较,通过限幅和积分环节之后,与机端电压  $V_{Term}$  比较,再经过闭环电压控制模块得到电压命令值  $E_{qcmd}$ 。

对应于图 4 中的无功功率控制模块如图 5 所示,共有 3 种控制模式。当无功标识符  $VLFLG$  为 0 时,为恒定无功功率控制模式,此时  $Q_{cmd}$  等于参考值  $Q_{ref}$ ;当  $VLFLG$  为 -1 时,为恒定功率因数控制,此时输入功率因数角参考值  $PFA_{ref}$  计算得到  $Q_{cmd}$ 。当  $VLFLG$  为 1 时,为恒定电压控制模式,通常研究者设置输电系统的公共耦合点母线电压  $|V| - IX$  作为监测值,与电压参考值  $V_{ref}$  作比较,经过 PI 控制器和惯性环节得到无功功率命令值  $Q_{cmd}$ ,其中  $X_c$  为线路调差率补偿电抗。参数  $F_N$  表示风电场在线运行的比例,如有一半的风机在线,  $F_N$  将设置成 0.5。

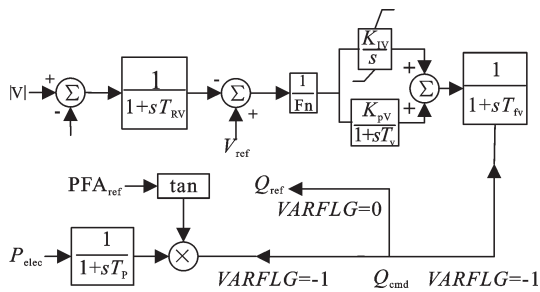


图 5 无功控制模块

对应于图 4 中的闭环电压控制模块如图 6 所示。从机端测量的  $Q_{elec}$  与图 5 无功控制模块输出的  $Q_{cmd}$  比较,通过开环或者闭环电压控制(取决于标识符  $VLFLG$  的设置),得到输入到发电机-换流器模型 WT3G 的输入信号  $E_{qcmd}$ 。当  $VLFLG$  为 0,旁路闭环电压控制;当  $VLFLG$  为 1,  $E_{qcmd}$  上、下限分别为  $V_{Term} + XIQ_{max}$  和  $V_{Term} - XIQ_{min}$ ;当  $VLFLG$  为 2,  $E_{qcmd}$  上、下限分别为  $XIQ_{max}$  和  $XIQ_{min}$ 。下文典型系统的仿真表明,由用户输入  $XIQ_{max}$  和  $XIQ_{min}$  将会很大程度上影响故障中和故障后的风机机端电压稳定。

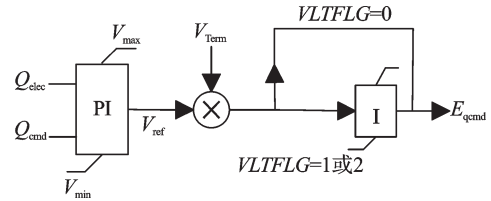


图 6 闭环电压控制模块

(2) 有功控制通道。如图 4 所示,研究者输入发电机有功功率  $P_{elec}$ ,通过转速功率曲线得到发电机转速偏差参考值  $WNDSP1$ ,与实际发电机转速偏差  $SPEED$  比较,通过 PI 控制器得到转矩命令值  $T_{ord}$ ,再与实际转速  $1 + SPEED$  相乘,经过 PI 控制器,将得到的有功功率命令值  $P_{ord}$  除以机端电压  $V_{Term}$ ,得到有功电流命令值  $I_{pcmd}$ 。

图 4 的有功通道中的转速功率曲线如图 7 所示,其调节特性可以分为 4 个区段<sup>[12]</sup>:① 最小转速运行(A-B 段):当有功功率达到最小值之前,将维持在最小转速运行。② 最优叶尖速比跟踪控制(B-C 段):在有功功率达到 0.75 p.u.之前保持最小的桨距角,使机械功率最大。③ 发电机功率和转矩控制(C-D 段):当达到 1.2 p.u.的额定转速且发电机有功功率未达到额定值 1.0 p.u.时,将基本维持风轮转速在额定值。④ 桨距角控制调节转速(D-E 段):风力机输出功率在 1.0 p.u.以上时,本研究调节桨距角从而控制传送给轴系的机械功率,直到功率回到额定值。转速控制器无法区分轴系加速是由系统内故障还是风速增大引起的。

用户可以根据风机的实际情况定义功率-速度特性曲线,如图 7 所示。用户需要输入发电机在有功功率分别等于 0.2 p.u.、0.4 p.u.、0.6 p.u.时的发电机转速,而发电机有功功率等于最小值、额定值时的转速以及在额定转速下的最小功率是不能由用户定义的。在实际的控制器中,速度参考值并不直接是发电机功率的函数,但整体的速度-功率关系是类似的。

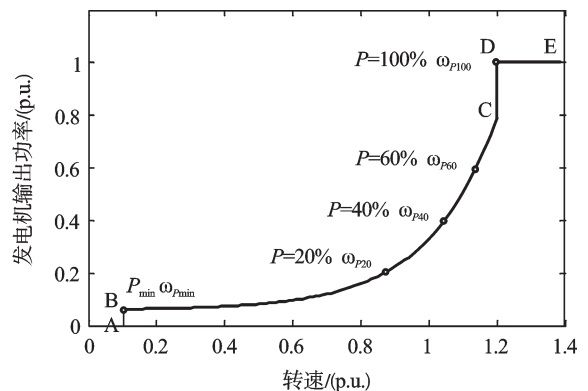


图 7 发电机有功功率-转速曲线

### 1.4 风力机及传动轴系模型(WT3T)

风力机及传动轴系模型 WT3T 采用的是双质量块



模型。模型中包括气动力学模型<sup>[13]</sup>,WT3T 1模型中气功率控制框图如图8所示,满足:

$$\Delta P_{aerot} = P_{aerot0} - P_{aerot} = (\beta - \beta_0) \beta K_{aerot} \quad (2)$$

式中:  $P_{aerot0}$  —初始气动功率,  $\beta$  —桨距角,  $\beta_0$  —初始桨距角,模型的其余部分具体参见文献[7]。

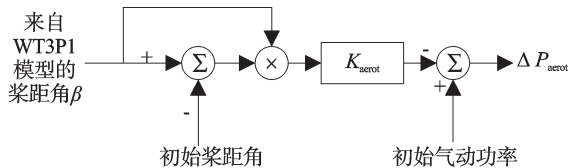


图8 WT3T1模型中气功率控制框图

### 1.5 保护模块

在标准的PSS/E风力机模型中并没有包含保护模块。但是在PSS/E中包含有CONET模型VTGTPA和FRQTPA,可以用于保护系统的电压和频率特性的仿真。

VTGTPA为过电压/欠电压保护模块。其工作原理是:设置一个高电压门限值 $V_U$ 和一个低电压门限值 $V_L$ ,当机端电压 $V_{Term}$ 大于 $V_U$ 或者小于 $V_L$ 时,计时器启动;当记录的电压越限时间大于 $TP$ 时,将使风机切除。

FRQTPA工作原理与VTGTPA类似,为高频/低频保护模块。其工作原理是:设置一个高电压门限值 $F_U$ 和一个低电压门限值 $F_L$ ,当频率大于 $F_U$ 或者小于 $F_L$ 时,计时器启动;当记录的电压越限时间大于 $TP$ 时,将使风机切除。

在过去,风电场额定功率小,在故障之后从电网脱离,不会对电网的电压稳定性造成影响。然而随着风电场的规模扩大,风电场从电网的分离很可能导致电网电压的不稳定。因此电网法规规定风电场在指定事件发生时能够持续运行一定的时间<sup>[14]</sup>,具有一定的低电压穿越能力。PSS/E的风机模型不包括低电压穿越模块,需要用户通过自定义模型等方式实现。

## 2 系统仿真测试

本研究采用的基于文献[15]单机无穷大系统进行仿真测试,测试系统如图9所示。从风电场高压母线到PCC点为双回线路。风电场的额定功率为100 MW,由67台1.5 MW的GE1500风机组成,功率因数设置为±0.95。

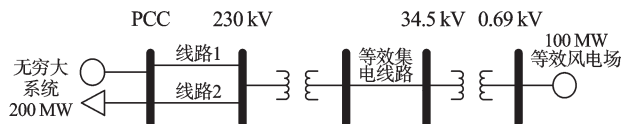


图9 单机无穷大测试系统

笔者主要研究了系统扰动对模型响应的影响。系统故障是加在线路1上,故障持续时间为250 ms,其后断开故障线路。

### 2.1 不具闭环电压控制的恒定无功控制

本研究设置 $VLFLG=0$ 且 $VARFLG=0$ ,则风机为不具闭环电压控制的恒定无功控制模式。风机和PCC点的电压曲线如图10所示。在故障期间,PCC点的电压跌至0;风机机端电压曲线形状跟PCC点类似,在故障区间跌至0.2 p.u.,并始终保持高于PCC点的电压。当故障线路从网络中断开之后,在风机机端和PCC点之间的阻抗上升,因此电压降落将会变大,导致恢复电压低于故障前的电压大小。

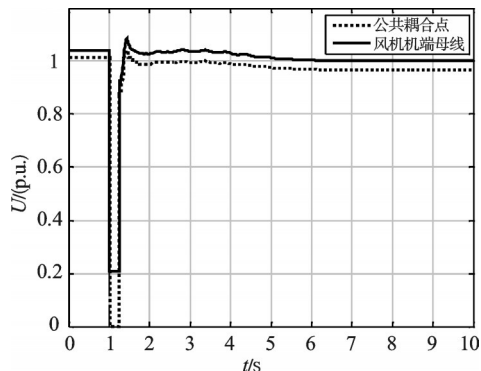


图10 风机机端和PCC点电压曲线

电功率、机械功率和气动功率曲线如图11所示。可以看出,当故障发生时,电功率减小到很低的值,机械功率和电功率之间的差值导致转子开始加速。轴系模型中的扭转振动将会反映到风机的输出功率。机械功率的峰值非常高,在振动的第一个周期就达到了接近2.0 p.u.的峰值。这个数值表明了轴系模型中的机械应力非常高。桨距角控制曲线如图12所示。

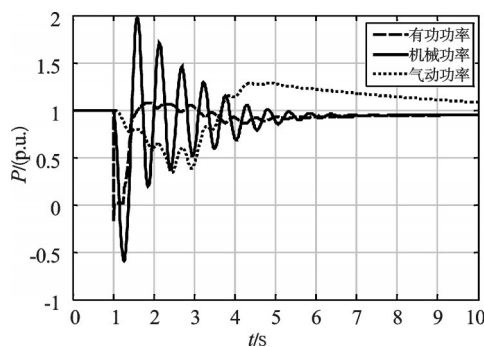


图11 电功率、机械功率和气动功率曲线

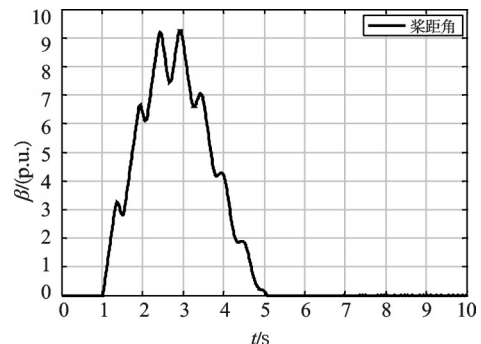


图12 桨距角控制曲线

图 12 显示,在故障期间桨距角增加,减小了风机的机械功率。桨距角的振动是由于风机转速控制所致。断开故障线路之后,风轮转速下降,但是桨距角持续上升了几秒,这是由于图 3 模型中的桨距角补偿部分为了减少风机的机械功率而增大了更多的桨距角。风轮和发电机速度曲线如图 13 所示。从图 13 可以看出,在两质量块模型中,发电机的速度振动与风轮速度振动方式是不同的。

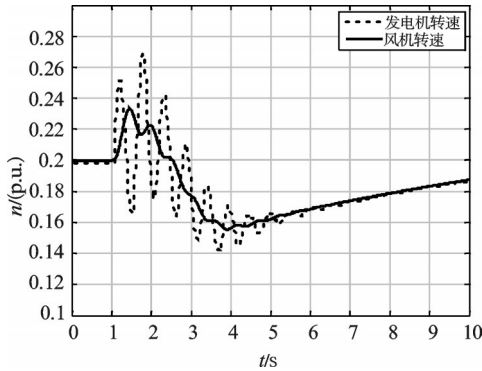


图 13 风轮和发电机速度曲线

### 2.2 具有闭环电压控制的恒定无功控制

本研究设置  $VARFLG=0$ ,  $VLTLFG=1$ , 即为具有闭环电压控制的恒定无功控制方式。无功命令等于参考值,内部电压大小由闭环控制环限制(如图 6 所示)。内部电压大小的上、下限分别为  $V_{Term} + XI_{Qmax}$  和  $V_{Term} - XI_{Qmin}$ 。在仿真中,用户可以自定义  $XI_{Qmax}$  和  $XI_{Qmin}$  的值。电压恢复曲线如图 14 所示,当  $XI_{Qmax}=0.4$  (GE1500 推荐值)时,无功上限较大,电压能够较快恢复;当  $XI_{Qmax}=0.1$  时,无功上限较小,导致电压恢复变慢。可见,当  $XI_{Qmax}$  的值太小,电压将无法恢复;当  $XI_{Qmax}$  太大时,将引起恢复过程中的电压振荡。 $XI_{Qmax}=0.1$  时的有功和无功曲线如图 15 所示,在故障期间有功出力降到 0,无功受到了  $XI_{Qmax}$  的限制。

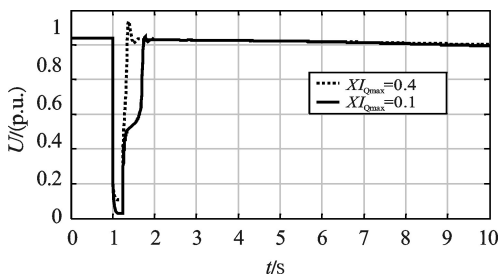


图 14  $XI_{Qmax}$  分别为 0.4、0.1 时的电压恢复曲线

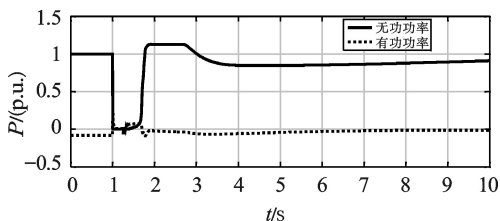


图 15 有功功率和无功功率曲线

### 3 结束语

通过 PSS/E 双馈风机模型的具体介绍,根据相应的仿真结果,本研究得到如下结论:

(1) 发电机-换流器模型(WT3G)。本研究将发电机看作带有暂态电抗的简化电流源,模型中并没有考虑发电机的损耗。机端电压  $V_{Term}$  过低时,有功功率输出会受到低压有功逻辑(LVPL)上限的限制,这样可以减少故障中与故障后的系统电压恢复压力,使无功具有调控优先权。

(2) 风力机及传动轴系模型(WT3T)和桨距控制模型(WT3P)。风力机及传动轴系模型采用了两质量块模型。故障期间的机械功率振动大小表明了传动系统的机械应力的数量级。在故障期间和故障之后,桨距角控制可以减少气动功率。此外,在仿真过程中笔者认为风速是恒定的,因此风速改变时对风机响应的影响在模型中是无法体现的。

(3) 电气控制模型(WT3E)。该模型共有 3 种方式控制电压和无功功率,分别是恒定电压控制、恒定功率因数控制、恒定无功功率控制。研究者可选择是否旁路闭环电压控制,当闭环电压控制使能时,极限值的输入很有可能导致电压的不稳定。为了避免该问题的发生,研究者可以提高控制器的上限  $XI_{Qmax}$ ,这将使故障期间的无功电流增大。此外,用户可以根据风机的实际调研情况定义速度-功率特性曲线。

(4) 模型中没有包含低电压穿越模块。风机的保护可以通过 VTGTPA 和 FRQTPA 实现,但是其实现曲线通常与电网要求不符。因此,PSS/E 中风机模型的保护模块(如低电压穿越)可以作为未来的研究方向。

### 参考文献(References):

- [1] 王伟,孙明冬. 双馈式风力发电机低电压穿越技术分析[J]. 电力系统自动化,2007,31(23):84-89.
- [2] 王定国,张红超. 双馈型风力发电机低电压穿越的分析研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(17):70-73.
- [3] OLIMPO A, NICK J, JANAKA E, et al. 风力发电的模拟与控制[M]. 徐政,译. 北京:机械工业出版社,2010:6-7.
- [4] 吕志强,许国东. 兆瓦级双馈风电机组电网故障时的暂态分析[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(23):112-116, 125.
- [5] 钱少锋,林俐,沈辉,等. 基于 PSS/E Wind 大型风电场并入输电网的动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(6):11-16.
- [6] 苏平,付纪华,赵新志,等. 电网不对称故障下双馈风力发电机组穿越控制的研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(16):101-106.

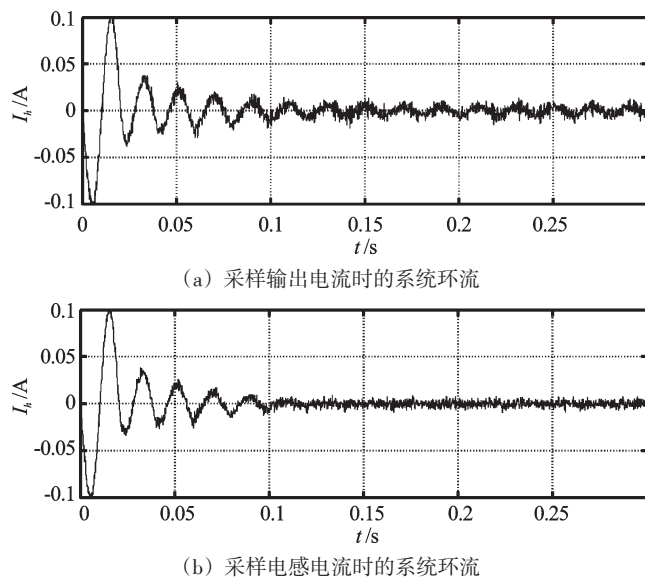


图4 系统负载为500 Ω电阻时系统环流

采样输出电流时的系统对环流的抑制效果。

### 3 结束语

笔者研究了一种以滤波电感电流代替输出电流计算功率调节量的方法。仿真及研究结果表明,采用该方法对系统轻载运行时的功率进行检测可以减小传感器精度的影响。同时,该方法虽然在功率检测时引入了滤波电容的无功分量,但在功率均分控制下,系统所受该无功分量的影响较小。系统额定运行时,两种采样方法对系统的控制效果基本相同;在系统轻载或空载运行时,系统环流的抑制效果要优于采样输出电流时的系统对环流的抑制效果。

### 参考文献(References):

- [1] 陈良亮. 无输出隔离变压器的逆变器并联系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院,2009:15-17.
- [2] SUN X, LEE Y S, XU D H. Modeling, analysis, and implementation of parallel multi-inverter systems with instantaneous average-current-sharing scheme [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, 18(3): 844-856.
- [3] 姜桂宾,裴云庆,杨旭,等. SPWM逆变电源的无互联系号线并联技术[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(12): 94-98.
- [4] TULADHAR A, JIN H, UNGER T, et al. Control of parallel inverters in distributed ac power system with consideration of line impedance effect[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000, 36(1): 131-137.
- [5] TAKAO K, SHIGENOR H. Parallel operation of voltage source inverters [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1988, 24(2): 281-287.
- [6] 肖岚,胡文斌,蒋渭忠,等. 基于主从控制的逆变器并联系统研究[J]. *东南大学学报:自然科学版*, 2002, 32(1): 133-137.
- [7] 肖岚,陈良亮,李睿,等. 基于有功和无功环流控制的DC-AC逆变器并联系统分析与实现[J]. *电工技术学报*, 2005, 20(10): 7-12.
- [8] HOLTZ J, WEMER K H. Multi-inverter UPS system with redundant load sharing control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1990, 37(6): 506-513.
- [9] 汪洪亮,岳秀梅,裴雪军,等. 逆变器并联系统的新功率算法及实现 [J]. *电机与控制学报*, 2010, 14(5): 37-43.
- [10] 于玮. UPS并联系统若干关键问题研究 [D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2009:63-64.

[编辑:李辉]

(上接第1084页)

- [7] Siemens PTI. PSS/E Model Library of PSS/E-32[R]. Schenectady, NY, USA, 2009.
- [8] Siemens PTI. Program Application Guide of PSS/E-32[R]. Schenectady, NY, USA, 2009.
- [9] 徐琼璟,徐政. PSS/E中的风电机组通用模型概述[J]. *电网技术*, 2010, 34(8): 176-182.
- [10] CIGRE Working Group C4. 601. Modeling and dynamic behavior of wind generation as it relates to power system control and dynamic performance [R]. Paris, France: CIGRE Working Group C4. 601, 2007.
- [11] CLARK K, MILLER N W, SANCHEZ-GASCA J J. Modeling of GE-Wind Turbine-Generators for Grid Studies [R]. NY, USA: General Electric International, Inc., 2008.
- [12] MILLER N W, SANCHEZ-GASCA J J, PRICE W W, et al. Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 MW Wind Turbine-generators for Stability Simulations [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. Toronto, Ontario: [s.n.], 2003.
- [13] PRICE W W, SANCHEZ-GASCA J J. Simplified Wind Turbine Generator Aerodynamic Models for Transient Stability Studies [C]. Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, GA, USA: [s.n.], 2006.
- [14] 关宏亮,赵海翔. 风电机组低电压穿越功能及其应用[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(10): 173-177.
- [15] SEYEDI M. Evaluation of the DFIG Wind Turbine Built-in Model in PSS/E [D]. Göteborg, Sweden: Division of Electric Power Engineering, Department of Environment and Energy, Chalmers University of Technology, 2009.

[编辑:李辉]